

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**2017**

**Bc. Jakub Janeček**

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroniky**

**Modelování a simulace regulovaného DC pohonu  
s uvažováním ztrát v motoru a převodovce**

**Modelling and Simulation of Controlled DC Drive  
with Account of Losses in Motor and Gearbox**

**2017**

**Bc. Jakub Janeček**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroniky

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jakub Janeček**  
Studijní program: N2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 2612T003 Aplikovaná elektronika  
Téma: Modelování a simulace regulovaného DC pohonu s uvažováním ztrát v motoru a převodovce  
Modelling and Simulation of Controlled DC Drive with Account of Losses in Motor and Gearbox

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor DC pohonu s regulací rychlosti a podřazenou smyčkou proudu
2. Vytvoření matematického modelu DC pohonu s uvažováním ztrát v motoru a převodovce
3. Vytvoření simulačního modelu DC pohonu s uvažováním ztrát v motoru a převodovce
4. Simulační ověření regulovaného DC pohonu

Seznam doporučené odborné literatury:

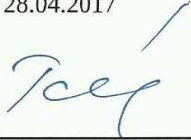
ČERNÝ M.: Elektrické pohony I. VUT Brno 1976.  
HRABOVCOVÁ V., RAFAJDUS P., FRANKO M., HUDÁK P.. Meranie a modelovanie elektrických strojov. 2. vydání. Žilinská Universita, 2009. 335 s. ISBN 978-80-8070-924-2.

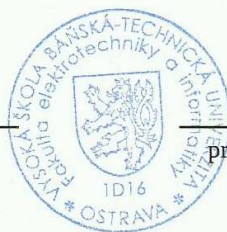
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ivo Neborák, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 28.04.2017

  
doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

**Poděkování:**

*Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu  
doc. Ing. Ivo Neborákovi, CSc. za odborné vedení a ochotu při konzultacích.*

*Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně.*

*Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.*

**V Ostravě, dne 27. 5. 2017**

**Podpis: Janušík.....**

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá modelováním a simulací regulovaného DC pohonu s uvažováním ztrát v motoru a převodovce. Je zde použit DC motor s permanentními magnety typu PM80S/2, který je napájen z čtyřkvadrantového pulzního měniče. Tento měnič umožňuje pracovat DC motoru ve čtyřech různých pracovních kvadrantech. Díky tomu může být tok energie od zdroje do DC motoru a dále přes převodovku do pracovního mechanismu, ale i od pracovního mechanismu přes převodovku do motoru a dále do zdroje. Tento tok energie je spojen se vznikem ztrát v motoru a převodovce. Tyto ztráty způsobují ztrátové momenty, které se spolu se ztrátami v motoru a převodovce v této práci zkoumají v různých pracovních režimech motoru. Správnost chování vytvořeného simulačního modelu se ověří pomocí srovnání teoretických a nasimulovaných momentů motorů. Simulační model byl vytvořen v programu Matlab, v jeho nadstavbové části Simulink.

## **Klíčová slova**

Ztráty v motoru, ztráty v převodovce, moment motoru, moment setrvačnosti, příkon, výkon, Simulink.

## **Abstrakt**

This diploma thesis deals with modeling and simulation of controlled DC drive with account of losses in motor and gearbox. There used DC motor with permanent magnets type PM80S / 2, which is powered by a four-quadrant pulse converter. This inverter allows DC motor to work in four different work quadrants. As a result, the flow of energy can be from the source to the DC motor and then through the gearbox to the working mechanism, but also from the working mechanism through the gearbox to the motor and next into the source. This energy flow is associated with the losses in motor and gearbox. These losses cause loss moments, along with losses in the motor and gearboxes in this work investigate in various motor operating modes. The correctness of the behavior of the created simulation model is verified by comparing the theoretical and simulated motor moments. The simulation model was created in the Matlab program, in its superstructure section, Simulink.

## **Keywords**

Losses in motor, losses in gearbox, motor torque, moment of inertia, power input, performance, Simulink.

# Obsah

Seznam použitých symbolů a indexů

Seznam ilustrací

Seznam tabulek

<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1. Teoretický rozbor DC pohonu s regulací rychlosti a podřazenou smyčkou proudu</b>	<b>2</b>
1.1 Princip podřazené regulace	2
1.2 Regulace proudu kotvy	2
1.3 Regulace rychlosti s podřazenou smyčkou proudu	5
1.4 Proudové omezení	6
<b>2. Vytvoření matematického modelu DC pohonu s uvažováním ztrát v motoru a převodovce</b>	<b>7</b>
2.1 Matematický model DC motoru	7
2.2 Poloha pracovního bodu pohonu	8
2.3 Reálný DC motor PM80S/2	10
2.4 Ztráty v motoru	12
2.4.1 Určení jmenovitých ztrát v motoru	12
2.4.2 Jmenovité ztráty závislé na zatížení	13
2.4.3 Jmenovité stále ztráty naprázdno	14
2.4.4 Určení ztrát motoru v obecném pracovním bodě	16
2.5 Pracovní mechanismus	18
2.6 Ztráty v převodovce	19
2.6.1 Určení jmenovitých ztrát v převodovce	19
2.6.2 Určení ztrát v převodovce v obecném pracovním bodě	21

<b>3. Sestavení simulačního modelu DC pohonu s uvažováním ztát</b>	
<b>    v motoru a převodovce</b>	<b>23</b>
3.1 Sestavení simulačního modelu DC pohonu s regulací rychlosti a podřazenou smyčkou proudu	23
3.2 Vytvoření simulačního bloku ztráty v motoru	24
3.2.1 Vytvoření simulačního bloku ztrát závislých na zatížení	25
3.2.2 Vytvoření simulačního bloku stálých ztrát naprázdno	26
3.3 Vytvoření bloku simulace brzdy	28
3.4 Simulace napěťové rovnice	28
3.5 Vytvoření simulačního bloku pro výpočet momentů	31
3.5.1 Vytvoření simulačního bloku ztrátového momentu motoru	32
3.5.2 Vytvoření simulačního bloku ztrátového momentu převodovky	35
3.5.3 Vytvoření simulačního bloku $M_{pr}$	34
<b>4. Simulační ověření regulovaného DC pohonu</b>	<b>35</b>
4.1 Zvedání a spouštění plně naloženého vozíku.	35
4.1.1 Výpočet celkového momentu setrvačnosti	36
4.1.2 Určení dynamických momentů pro zrychlení	38
4.1.3 Určení dynamických momentů pro zpomalení	39
4.1.4 Určení požadovaného momentu motoru	40
4.1.5 Grafické znázornění veličin ze simulačního modelu	42
4.2 Zvedání a spouštění prázdného vozíku.	45
4.3 Porovnání vykonané práce.	48
<b>Závěr</b>	<b>49</b>
<b>Použitá literatura</b>	<b>50</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>51</b>

## Seznam použitých symbolů a indexů

$a$	[-]	Činitel konstantních ztrát
$b$	[-]	Činitel proměnných ztrát
$c\phi$	[Vs]	Elektromagnetická konstanta stroje
$d_b$	[m]	Průměr navíjecího bubnu
$F_G$	[N]	Tíhová síla
$F_{\text{mot}}(p)$	[-]	Přenos motoru
$F_{\text{PM}}(p)$	[-]	Přenos pulzního měniče
$F_{\text{RI}}(p)$	[-]	Přenos regulátoru proudu
$I_{\text{ac}}$	[A]	Proud kotvy
$i$	[-]	Převodový poměr převodovky
$J_b$	[kg m <sup>2</sup> ]	Moment setrvačnosti bubnu
$J_c$	[kg m <sup>2</sup> ]	Celkový moment setrvačnosti pohonu
$J_m$	[kg m <sup>2</sup> ]	Moment setrvačnosti motoru
$J_{\text{mg}}$	[kg m <sup>2</sup> ]	Moment setrvačnosti posuvné hmoty
$J_p$	[kg m <sup>2</sup> ]	Moment setrvačnosti převodovky
$J_{\text{pr}}$	[kg m <sup>2</sup> ]	Moment setrvačnosti na výstupní straně převodovky přepočítaný na hřídel motoru
$k$	[-]	Konstanta
$L_{\text{ac}}$	[H]	Indukčnost obvodu kotvy
$M_{\text{am}}$	[Nm]	Dynamický moment potřebný k urychlení rotačních setrvačných hmot na straně motor - převodovka
$M_{\text{dm}}$	[Nm]	Dynamický moment potřebný k zpomalení rotačních setrvačných hmot na straně motor - převodovka
$M_d$	[Nm]	Dynamický moment
$M_e$	[Nm]	Elektromagnetický moment motoru
$M_L$	[Nm]	Moment zátěže



$M_m$	[Nm]	Mechanický moment motoru
$M_n$	[Nm]	Jmenovitý moment převodovky
$M_{pm}$	[Nm]	Moment pracovního mechanismu
$M_{pr}$	[Nm]	Moment pracovního mechanismu přepočítaný na hřídel na motoru
$M_{lab}$	[Nm]	Dynamický moment potřebný k urychlení bubnu a zátěže přepočítaný na hřídel motoru
$M_{ldb}$	[Nm]	Dynamický moment potřebný k zpomalení bubnu a zátěže přepočítaný na hřídel motoru
$M_{2ab}$	[Nm]	Dynamický moment potřebný k urychlení setrvačných hmot na straně buben - zátěž
$M_{2db}$	[Nm]	Dynamický moment potřebný k zpomalení setrvačných hmot na straně buben - zátěž
$m_b$	[kg]	Hmotnost bubnu
$m_v$	[kg]	Celková hmotnost vozíku
$n$	[-]	Jmenovitá hodnota symbolu
$P_m$	[W]	Mechanický výkon motoru
$P_p$	[W]	Elektrický příkon motoru
$R_{ac}$	[Ω]	Odpor obvodu kotvy
$U_a$	[V]	Svorkové napětí
$U_i$	[V]	Indukované napětí
$U_k$	[V]	Komutační napětí
$\alpha_{am}$	[rad/s]	Úhlové zrychlení motoru
$\alpha_{dm}$	[rad/s]	Úhlové zpomalení motoru
$\Delta M$	[Nm]	Ztrátový moment v převodovce
$\Delta M_k$	[Nm]	Ztráty konstantní
$\Delta M_m$	[Nm]	Ztrátový moment motoru
$\Delta M_v$	[Nm]	Variabilní ztráty
$\Delta P$	[W]	Ztráty v motoru

$\Delta P_a$	[W]	Aerodynamické ztráty
$\Delta P_{ad}$	[W]	Přídavné ztráty
$\Delta P_b$	[W]	Ztráty v budícím obvodu
$\Delta P_{fe}$	[W]	Ztráty v železe
$\Delta P_h$	[W]	Hysterezní ztráty
$\Delta P_j$	[W]	Joulovy ztráty
$\Delta P_k$	[W]	Ztráty na kartáči
$\Delta P_k$	[W]	Mechanické ztráty
$\Delta P_v$	[W]	Ztráty závislé na zatížení
$\Delta P_{vp}$	[W]	Ztráty vířivými proudy
$\Delta P_t$	[W]	Třecí ztráty
$\Delta P_0$	[W]	Stále ztráty naprázdno
$\Delta U_k$	[V]	Úbytek napětí mezi kartáčem a komutátorem
$\eta_m$	[%]	Účinnost motoru
$\eta_p$	[%]	Účinnost převodovky
$\tau_{ac}$	[s]	Elektromagnetická časová konstanta
$\tau_m$	[s]	Mechanická časová konstanta
$\omega$	[rad/s]	Úhlová rychlost motoru

## Seznam ilustrací

Obr. 1. Schéma podřazených regulačních smyček.....	2
Obr. 2. Blokové schéma regulačního obvodu proudu kotvy.....	2
Obr. 3. Upravené blokové schéma regulačního obvodu proudu kotvy.....	3
Obr. 4. Zjednodušené blokové schéma regulace proudu pro $\tau_m \gg 4 \tau_{ac}$ .....	4
Obr. 5. Struktura regulace rychlosti s podřazenou regulací proudu DC pohonu.....	5
Obr. 6. Blokové schéma regulace rychlosti.....	5
Obr. 7. Zjednodušené blokové schéma regulace rychlosti s podřazenou proudovou smyčkou.....	6
Obr. 8. Blokové schéma stejnosměrného motoru.....	8
Obr. 9. Zapojení čtyřkvadrantového pulzního měniče.....	8
Obr. 10. Pracovní režimy v rovině $\omega - M$ .....	9
Obr. 11. Tok výkonu pro první a třetí kvadrant (motorický režim).....	9
Obr. 12. Tok výkonu pro druhý a čtvrtý kvadrant (generátorový režim).....	10
Obr. 13. Zjednodušené kinematické schéma pohonu.....	18
Obr. 14. Potenciální zatěžovací moment.....	19
Obr. 15. Závislost koeficientů konstantních a proměnlivých ztrát na jmenovité účinnosti převodu.....	20
Obr. 16. Reakční zatěžovací moment.....	21
Obr. 17. Simulační model DC pohonu s regulací rychlosti a podřazenou smyčkou proudu.....	23
Obr. 18. Simulační model PI regulátoru otáček (proudu).....	23
Obr. 19. Blok pro výpočet ztrát v motoru.....	24
Obr. 20. Struktura bloku ztráty v motoru.....	24
Obr. 21. Struktura bloku ztrát závislých na zatížení.....	25
Obr. 22. Blok pro výpočet Joulových ztrát.....	25
Obr. 23. Blok pro výpočet ztrát na kartáči.....	25
Obr. 24. Struktura bloku pro výpočet stálých ztrát naprázdno.....	26
Obr. 25. Struktura bloku pro výpočet ztrát vlivem vířivých proudů.....	26
Obr. 26. Struktura bloku pro výpočet ztrát vlivem hystereze.....	27
Obr. 27. Struktura bloku pro výpočet třecích ztrát.....	27
Obr. 28. Struktura bloku pro výpočet aerodynamických ztrát.....	27
Obr. 29. Blok pro simulaci brzdy. ....	28
Obr. 30. Struktura bloku pro simulaci brzdy.....	28
Obr. 31. Polarita napětí a proudu pro první a třetí kvadrant.....	29
Obr. 32. Polarita napětí a proudu pro druhý a čtvrtý kvadrant.....	29
Obr. 33. Blok pro výpočet polarit komutačního napětí.....	29
Obr. 34. Struktura bloku $U_k$ .....	30
Obr. 35. Blok pro zjištění pracovního režimu motoru.....	30
Obr. 36. Struktura bloku pro zjištění pracovního režimu.....	31
Obr. 37. Blok pro výpočet momentů.....	31
Obr. 38. Struktura bloku pro výpočet momentů.....	31
Obr. 39. Struktura bloku ztrátového momentu motoru.....	33
Obr. 40. Odčítání jednotlivých momentů v simulačním modelu.....	33
Obr. 41. Blok pro zjištění polarity momentu.....	33
Obr. 42. Struktura bloku zjištění polarity momentu.....	33
Obr. 43. Struktura bloku ztrátového momentu v převodovce.....	34
Obr. 44. Struktura bloku $M_{pr}$ .....	34
Obr. 45. Zadaný a skutečný průběh rychlosti.....	36
Obr. 46. Průběh momentu motoru.....	42
Obr. 47. Průběh kotevního motoru.....	43
Obr. 48. Porovnání průběhů ztrátového momentu motoru, ztrátového momentu převodovky a momentu pracovního mechanismu přepočítaného na hřídel motoru.....	43
Obr. 49. Porovnání elektrického příkonu, mechanického výkonu a ztrát v motoru.....	44

Obr. 50. Zadaný a skutečný průběh rychlosti.....	45
Obr. 51. Průběh momentu motoru.....	45
Obr. 52. Průběh kotevního proudu.....	46
Obr. 53. Porovnání průběhů ztrátového momentu motoru, ztrátového momentu převodovky a momentu pracovního mechanismu přepočítaného na hřídel motoru.....	47
Obr. 54. Porovnání elektrického příkonu a mechanického výkonu a ztrát v motoru.....	47

## Seznam tabulek

Tab. 1. Změna parametrů pro simulační model při změně zatížení.....	35
Tab. 2. Požadovaný průběh rychlosti motoru.....	36
Tab. 3. Srovnání vypočtených a nasimulovaných hodnot momentu motoru.....	42
Tab. 4. Porovnání práce a celkové účinnosti.....	48

# Úvod

Tato diplomová práce je zaměřena na rozdělení a výpočet konkrétních ztrát v motoru a převodovce regulovaného DC pohonu při práci v různých pracovních kvadrantech.

V úvodní první kapitole je popsán všeobecně známý rozbor DC pohonu s regulací rychlosti a podřazenou smyčkou proudu. Tento rozbor slouží k návrhu regulátoru proudu pomocí metody optimálního modulu a k návrhu regulátoru rychlosti pomocí metody symetrického optima pro simulační model v programu Matlab v jeho nadstavbové části Simulink.

Druhá kapitola se zabývá vytvořením matematického modelu DC motoru a popsáním v jakých režimech může tento motor pracovat. Jsou zde popsány a rozebrány všechny druhy ztrát v DC motoru a převodovce. Pro následnou správnou funkčnost simulačního modelu je důležité popsat rozdíl mezi potenciálním a reakčním zatěžovacím momentem.

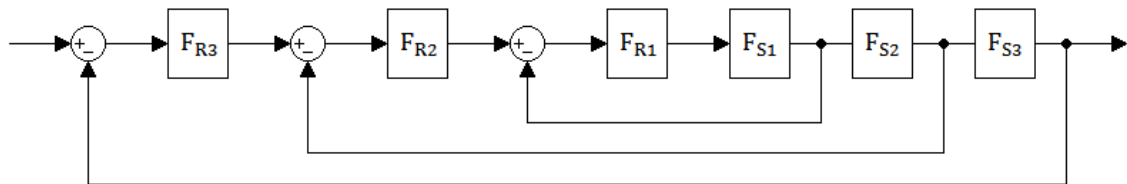
Sestavením simulačního modelu DC pohonu s uvažováním ztrát v motoru a převodovce se věnuje třetí kapitola. Pomocí různých bloků v Simulinku je sestaven funkční simulační model, který vychází z rozboru ztrát v motoru a převodovce. Tyto ztráty vytvářejí ztrátové momenty, které působí proti momentu motoru anebo ho podporují. Pro nulové otáčky motoru je vytvořen blok simulace brzdy.

Simulační ověření regulovaného DC pohonu obsahuje poslední čtvrtá kapitola. DC pohon je spojen s pracovním mechanismem (vozíkem) přes převodovku. Pracovní mechanismus a převodovka vč. jejich parametrů odpovídá situaci laboratorní úlohy pohonu zdvihu v laboratoři EB016. DC motor bude zvedat a spouštět prázdný, resp. zatížený vozík. Ověření správnosti simulačního modelu se provede pomocí vypočtených a nasimulovaných hodnot. Bude porovnána vykonaná práce a vliv zatížení na ztráty v motoru a převodovce.

# 1. Teoretický rozbor DC pohonu s regulací rychlosti a podřazenou smyčkou proudu

## 1.1 Princip podřazené regulace

S použitím věty o součtu malých časových konstant se regulační obvod rozdělí na řadu podřazených smyček (obr. 1). Nadřazená regulační smyčka zadává žádanou hodnotu pro podřazenou regulační smyčku. Lze tím dosáhnout toho, že každá dílčí soustava  $F_{S1}$ ,  $F_{S2}$ ,  $F_{S3}$  obsahuje zpravidla jen jednu větší časovou konstantu, která může být vykompenzována časovou konstantou regulátoru  $F_{R1}$ ,  $F_{R2}$ ,  $F_{R3}$  zpravidla s jednoduchým přenosem proporcionálně integračního regulátoru. Ten lze snadno nastavit a je necitlivý vůči poruchovým signálům. Uzavřená vnitřní smyčka proudu představuje součást nadřazené regulační smyčky. [1]

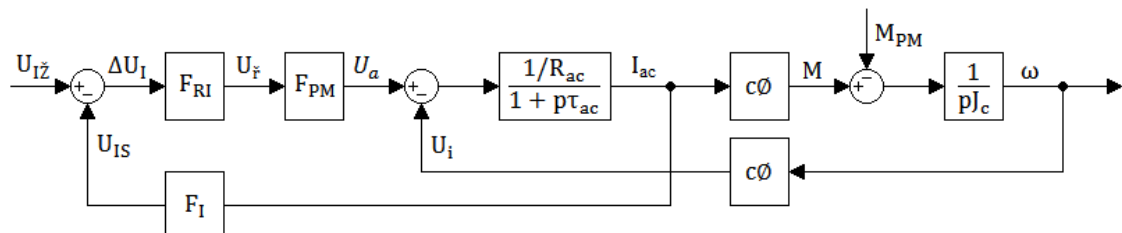


Obr. 1. Schéma podřazených regulačních smyček. [1]

## 1.2 Regulace proudu kotvy

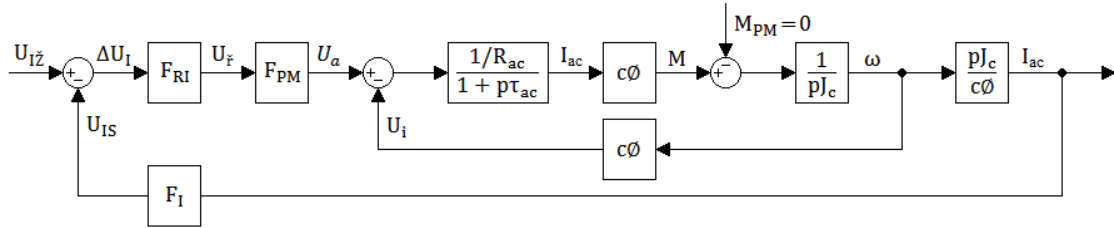
Regulace proudu kotvy u stejnosměrných pohonů se používá k zajištění časově optimálního průběhu přechodných dějů a možnosti nastavení proudového omezení na hodnotu dovoleného proudu motoru. Požadavek časově optimálního průběhu znamená, že všechny přechodné děje, tj. rozběh, brzdění, zrychlení a zpomalení musí probíhat s konstantním maximálním proudem. Nejjednodušší realizací tohoto požadavku je zapojení podřazené regulační smyčky proudu. [1]

Blokové schéma regulace proudu kotvy (obr. 2) obsahuje přenos pulzního měniče  $F_{PM}$ , přenos čidla proudu s filtrací  $F_I$ , přenos regulátoru proudu  $F_{RI}$  a dále známý matematický model DC motoru s permanentními magnety. Regulační obvod proudu by měl být navržen tak, aby měl jen nepatrné zpoždění. [1]



Obr. 2. Blokové schéma regulačního obvodu proudu kotvy. [1]

Blokové schéma regulačního obvodu proudu kotvy se upraví pro  $U_{I\dot{z}}$  tak, že se přesune signál s proudem za mechanický blok motoru, aby se odstranili křížové vazby v blokovém schématu a na výstupu byl kotevní proud  $I_{ac}$  (obr. 3). [1]



Obr. 3. Upravené blokové schéma regulačního obvodu proudu kotvy. [1]

Pro syntézu regulátoru proudu je výhodné nahradit přenos motoru přenosem: [1]

$$F_{mot}(p) = \frac{\omega(p)}{U_a(p)} = \frac{\frac{1}{c\phi}}{1 + p\tau_m + p^2\tau_m\tau_{ac}} \cong \frac{\frac{1}{c\phi}}{(1 + p\tau_m)(1 + p\tau_{ac})} \quad (1.201)$$

Toto lze korektně provést pro  $\tau_m \gg \tau_{ac}$ . Tato podmínka je ve většině případů splněna.

Mechanická časová konstanta:

$$\tau_m = \frac{J_c R_{ac}}{(c\phi)^2} \quad (1.202)$$

Elektromagnetická časová konstanta:

$$\tau_{ac} = \frac{L_{ac}}{R_{ac}} \quad (1.203)$$

Přenos soustavy proudu kotvy: [1]

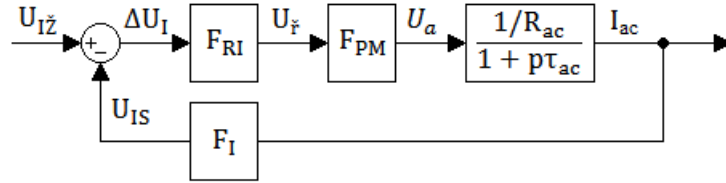
$$\begin{aligned} F_{SI}(p) &= F_{PM}(p)F_{mot}(p)\frac{pJ_c}{c\phi}F_I = \frac{K_{PM}}{(1 + p\tau_{PM})} \frac{\frac{1}{c\phi}}{(1 + p\tau_m)(1 + p\tau_{ac})} \frac{pJ_c}{c\phi} \frac{K_I}{(1 + p\tau_I)} \\ &= \frac{p\tau_m}{(1 + p\tau_m)} \frac{K_{PM}}{(1 + p\tau_{PM})} \frac{\frac{1}{R_{ac}}}{(1 + p\tau_{ac})} \frac{K_I}{(1 + p\tau_I)} \\ &= \frac{p\tau_m}{(1 + p\tau_m)} \frac{K_{SI}}{(1 + p\tau_{PM})(1 + p\tau_{ac})(1 + p\tau_I)} \end{aligned} \quad (1.204)$$

Zesílení soustavy proudové smyčky:

$$K_{SI} = K_{PM} * K_I * \frac{1}{R_{ac}} \quad (1.205)$$



Při praktickém návrhu regulátoru proudu na základě metody optimálního modulu nebo symetrického optima se vychází z blokového schématu na obr. 3. Z něj vycházející přenos soustavy proudu se dá dále zjednodušit, pokud platí, že  $\tau_m \gg 4 \tau_{ac}$ . Pak se neuplatní změny indukovaného napětí, neboť probíhají daleko pomaleji, než přechodný děj proudu v kotvě motoru. V tomto případě vnitřní zpětná vazba indukovaného napětí motoru může být vynechána a schéma se značně zjednoduší (obr. 4). [1]



Obr. 4. Zjednodušené blokové schéma regulace proudu pro  $\tau_m \gg 4 \tau_{ac}$ . [1]

Po předchozí úpravě je přenos soustavy proudu kotvy:

$$F_{SI}(p) = \frac{K_{SI}}{(1 + p\tau_{PM})(1 + p\tau_{ac})(1 + p\tau_I)} = \frac{K_{SI}}{(1 + p\tau_{ac})(1 + p\tau_{\sigma I})} \quad (1.206)$$

kde  $\tau_{\sigma I}$  je malá součtová časová konstanta proudového obvodu:

$$\tau_{\sigma I} = \tau_{PM} + \tau_I \quad (1.207)$$

Při provedení optimalizace obvodu proudu dle schématu na obr. 4, vychází regulátor dle metody optimálního modulu typu PI s přenosem regulátoru:

$$F_{RI}(p) = \frac{F_{0I}(p)}{F_{SI}(p)} = \frac{\frac{1}{2p\tau_{\sigma I}(1 + p\tau_{\sigma I})}}{\frac{K_{SI}}{(1 + p\tau_{ac})(1 + p\tau_{\sigma I})}} = \frac{\tau_{ac}}{2K_{SI}\tau_{\sigma I}} \frac{(1 + p\tau_{ac})}{p\tau_{ac}} = K_{RI} \frac{(1 + p\tau_{RI})}{p\tau_{RI}} \quad (1.208)$$

Provede-li se návrh regulátoru dle metody symetrického optima, vyjde opět regulátor typu PI. Vychází se ale z úpravy přenosu soustavy podle:

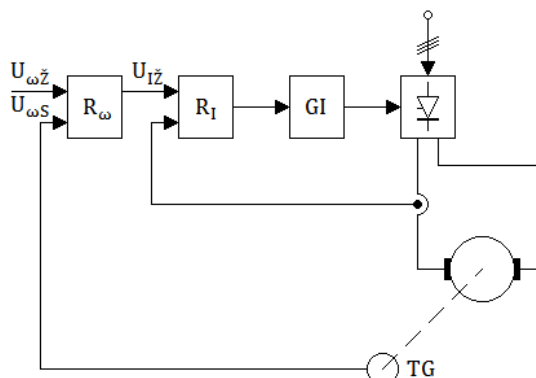
$$F_{SI}(p) = \frac{K_{SI}}{(1 + p\tau_{ac})(1 + p\tau_{\sigma I})} = \frac{K_{SI}}{p\tau_{ac}(1 + p\tau_{\sigma I})} \quad (1.209)$$

Přenos samotného regulátoru:

$$F_{RI}(p) = \frac{F_{0I}(p)}{F_{SI}(p)} = \frac{\frac{(1 + p4\tau_{\sigma I})}{8p^2\tau_{\sigma I}^2(1 + p\tau_{\sigma I})}}{\frac{K_{SI}}{p\tau_{ac}(1 + p\tau_{\sigma I})}} = \frac{\tau_{ac}}{2K_{SI}\tau_{\sigma I}} \frac{(1 + p4\tau_{\sigma I})}{p4\tau_{\sigma I}} = K_{RI} \frac{(1 + p\tau_{RI})}{p\tau_{RI}} \quad (1.210)$$

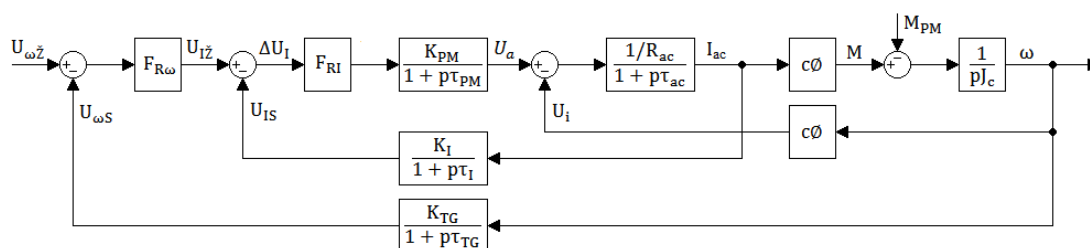
### 1.3 Regulace rychlosti s podřazenou smyčkou proudu

Regulační obvod proudu je součástí rychlostní regulace. Jeho dynamické chování proto výrazně ovlivňuje průběh regulace rychlosti. Struktura regulace pohonu je naznačena na obr. 5. [2]



Obr. 5. Struktura regulace rychlosti s podřazenou regulací proudu DC pohonu. [2]

Blokové schéma rychlostní regulace je na obr. 6. Uvažuje se v něm filtrace signálu tachogenerátoru s časovou konstantou  $\tau_{TG}$ .



*Obr. 6. Blokové schéma regulace rychlosti. [2]*

Podřízený regulační obvod proudu se aproximuje setrvačným členem: [2]

$$F_{KI} = \frac{\frac{1}{\bar{K}_I}}{1 + p\tau_n} \quad (1.31)$$

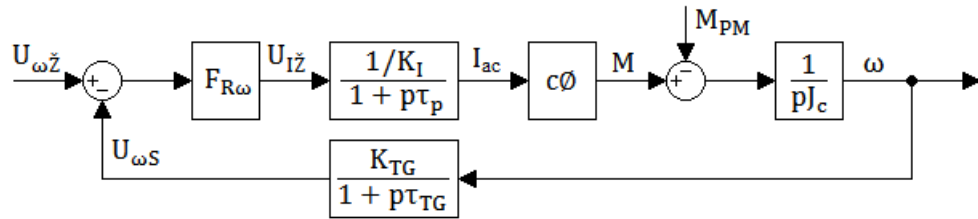
Kde  $\tau_p$  je náhradní časová konstanta proudové smyčky. Výpočet  $\tau_p$  pro metodu optimálního modulu:

$$\tau_p = 2(\tau_{pM} + \tau_I) \quad (1.32)$$

Výpočet  $\tau_p$  dle metody symetrického optima:

$$\tau_p = 4(\tau_{pM} + \tau_l) \quad (1.33)$$

Touto úpravou se zjednoduší blokové schéma (obr. 7).



Obr. 7. Zjednodušené blokové schéma regulace rychlosti s podřazenou proudovou smyčkou. [2]

Přenos soustavy:

$$F_{S\omega}(p) = \frac{1}{\frac{1}{K_I}} \frac{c\phi}{1 + p\tau_p} \frac{K_{TG}}{pJ_c} = \frac{K_{S\omega}}{p(1 + p\tau_{\sigma\omega})} \quad (1.34)$$

kde  $K_{S\omega}$  je zesílení soustavy:

$$K_{S\omega} = \frac{1}{K_I} \frac{c\phi}{J_c} K_{TG} \quad (1.35)$$

Součtová malá časová konstanta:

$$\tau_{\sigma\omega} = \tau_p + \tau_{TG} \quad (1.36)$$

Optimalizací metody optimálního modulu vychází regulátor typu P s přenosem (zesílením):

$$F_{R\omega}(p) = \frac{F_{0\omega}(p)}{F_{S\omega}(p)} = \frac{1}{\frac{K_{S\omega}}{p(1 + p\tau_{\sigma\omega})}} = \frac{1}{2K_{S\omega}\tau_{\sigma\omega}} \quad (1.37)$$

V případě optimalizace metody symetrického optima vychází regulátor typu PI s přenosem:

$$\begin{aligned} F_{R\omega}(p) &= \frac{F_{0\omega}(p)}{F_{S\omega}(p)} = \frac{\frac{(1 + p4\tau_{\sigma\omega})}{8p^2\tau_{\sigma\omega}^2(1 + p\tau_{\sigma\omega})}}{\frac{K_{S\omega}}{p(1 + p\tau_{\sigma\omega})}} = \frac{1}{2K_{S\omega}\tau_{\sigma\omega}} \frac{(1 + p4\tau_{\sigma\omega})}{p4\tau_{\sigma\omega}} = \\ &= K_{R\omega} \frac{(1 + p\tau_{R\omega})}{p\tau_{R\omega}} \end{aligned} \quad (1.38)$$

## 1.4 Proudové omezení

Proudové omezení se dosáhne omezením žádané hodnoty proudu  $I_z$  na výstupu rychlostního regulátoru. Prakticky stejný průběh bude mít v simulaci i skutečný proud kotvy, jelikož přechodné děje v proudu jsou daleko rychlejší, než děje v průběhu rychlosti. Dojde-li ke skokové změně žádané rychlosti v čase  $t = 0$ , objeví se na výstupu regulátoru rychlosti velká odchylka, která je omezena na hodnotu odpovídající proudovému omezení. S narůstající rychlostí motoru se regulační odchylka rychlosti  $\Delta\omega$  dostane pod hodnotu omezení, pak začne působit teprve vlastní rychlostní regulace. Ta byla do té doby rozpojená a regulaci vedl proudový obvod. Tímto způsobem se realizuje účinné proudové omezení. [1]

## 2. Vytvoření matematického modelu DC pohonu s uvažováním ztát v motoru a převodovce

### 2.1 Matematický model DC motoru

Pro vytvoření matematického modelu se vychází z rovnic DC motoru s permanentními magnety se zahrnutím elektromagnetických dějů a s uvažováním obvyklých zjednodušujících předpokladů, kdy je zanedbána reakce kotvy a dále jsou uvažovány konstantní parametry motoru (indukčnosti, odpory,  $c\phi$ ). [3]

Rovnice vyjádřené v časové oblasti: [3]

$$u_a = u_i + R_{ac} * i_{ac} + L_{ac} * \left( \frac{di_{ac}}{dt} \right) \quad (2.101)$$

$$\tau_{ac} = \frac{L_{ac}}{R_{ac}} \quad (2.102)$$

$$u_i = c\phi * \omega \quad (2.103)$$

$$M_e = c\phi * i_{ac} \quad (2.104)$$

$$M_e - M_L = J_c * \frac{d\omega}{dt} \quad (2.105)$$

Rovnice po Laplaceově transformaci:

$$U_a(p) = U_i(p) + R_{ac}I_{ac}(p) + L_{ac}(p)I_{ac}(p) \quad (2.106)$$

$$U_a(p) = U_i(p) + R_{ac}I_{ac}(p)(1 + p\tau_{ac}) \quad (2.107)$$

$$U_i(p) = c\phi\omega(p) \quad (2.108)$$

$$M_e(p) = c\phi I_{ac}(p) \quad (2.109)$$

$$M_e(p) - M_L(p) = J_c(p)\omega(p) \quad (2.110)$$

Dalším krokem je převod na operátorové přenosy:

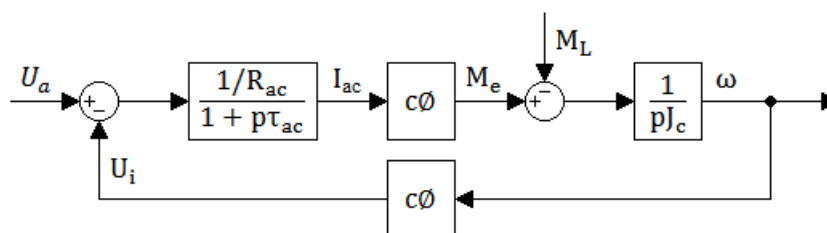
$$F_a(p) = \frac{I_{ac}(p)}{U_a(p) - U_i(p)} = \frac{1}{R_{ac}(1 + p\tau_{ac})} \quad (2.111)$$

$$F_{c\phi}(p) = \frac{U_i(p)}{\omega(p)} \quad (2.112)$$

$$F_{c\phi}(p) = \frac{M_e(p)}{I_{ac}(p)} \quad (2.113)$$

$$F_{mot}(p) = \frac{\omega(p)}{M_e(p) - M_L(p)} = \frac{1}{pJ_c} \quad (2.114)$$

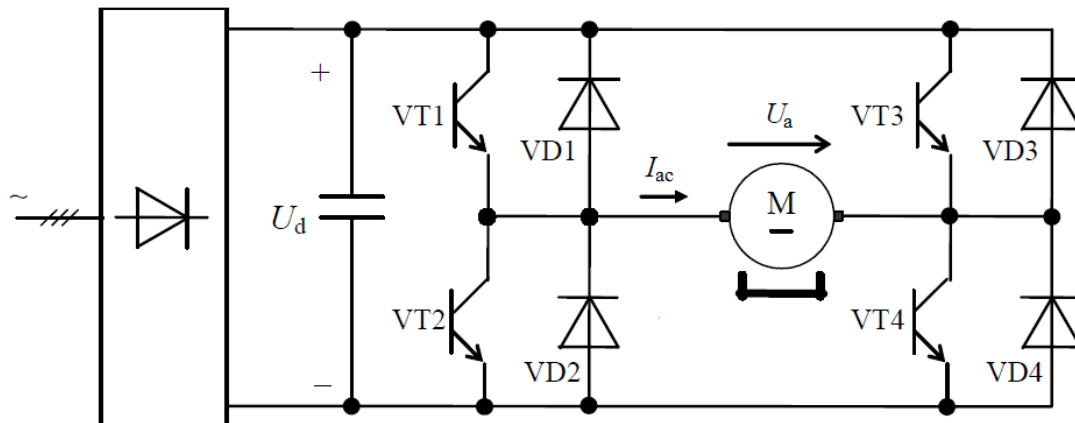
Vytvořené blokové schéma DC motoru:



Obr. 8. Blokové schéma stejnosměrného motoru. [3]

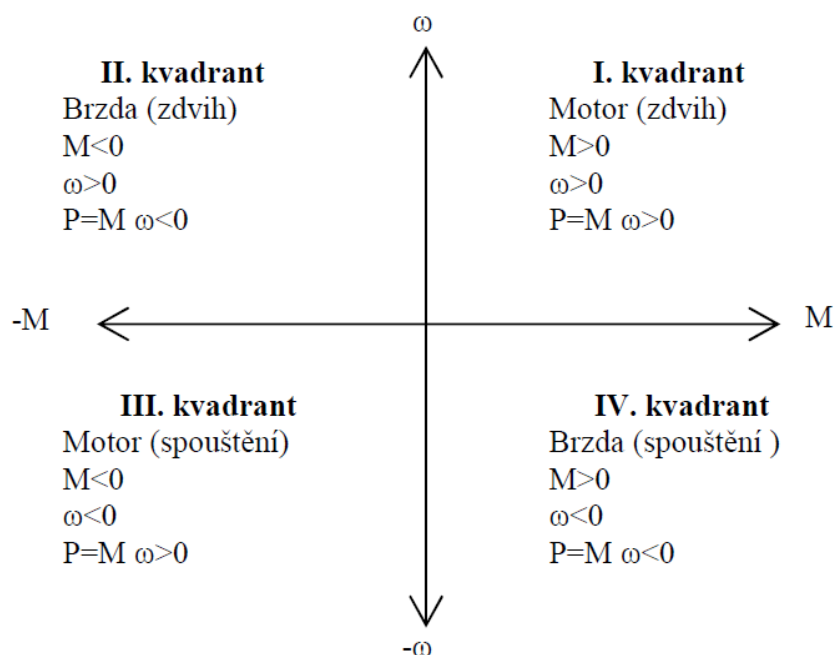
## 2.2 Poloha pracovního bodu pohonu

Motor je napájen z čtyřkvadrantového pulzního měniče (obr. 9).



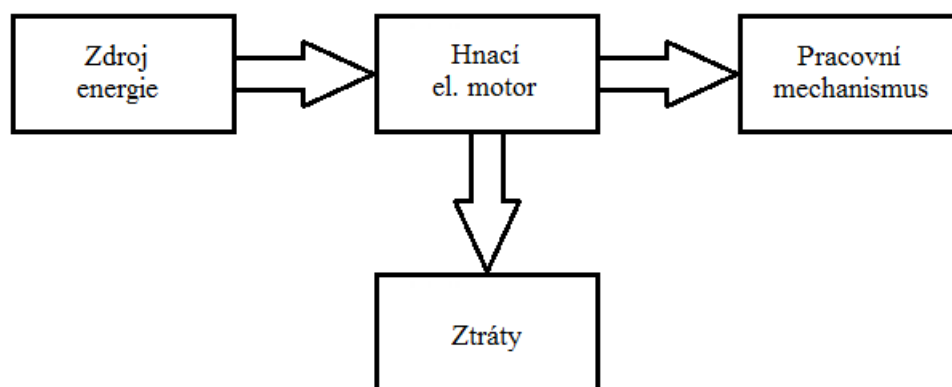
Obr. 9. Zapojení čtyřkvadrantového pulzního měniče. [3]

Tento čtyřkvadrantní pulzní měnič umožňuje změnu směru proudu i polarity napětí, proto motoru umožňuje pracovat ve čtyřech různých kvadrantech (obr. 10).



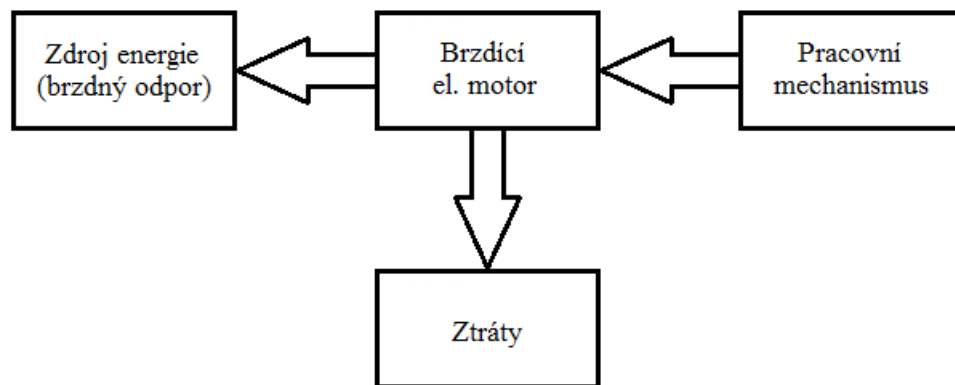
Obr. 10. Pracovní režimy v rovině  $\omega - M$ . [4]

Pokud dojde k sepnutí VT1 a VT4 (obr. 9), motor bude napájen napětím i proudem větším než nula a bude pracovat v prvním kvadrantu – otáčky budou kladné. Při sepnutí VT2 a VT3, motor bude napájen opačnou polaritou napětí i proudem - to povede k opačnému směru pohybu hřídele motoru vůči prvnímu kvadrantu. Motor pak bude mít otáčky i moment menší než nula a bude pracovat ve třetím kvadrantu. Při práci motoru v prvním a třetím kvadrantu se jedná o motorický režim. To znamená, že tok energie je ze zdroje do motoru a dále do pracovního mechanismu (obr. 11).



Obr. 11. Tok výkonu pro první a třetí kvadrant (motorický režim).

Ve druhém a čtvrtém kvadrantu dochází ke změně směru toku energie. Tok energie je z pracovního mechanismu do motoru a dále do zdroje (obr. 12). Motor se stává generátorem elektrické energie, proto se práce v těchto kvadrantech nazývá generátorový režim.



Obr. 12. Tok výkonu pro druhý a čtvrtý kvadrant (generátorový režim).

## 2.3 Reálný DC motor PM80S/2

V této práci jsou použity pro výpočty údaje z reálného stejnosměrného motoru s permanentními magnety typu PM80S/2.

Základní parametry motoru ze štítku:

Jmenovitý mechanický výkon	400 W
Jmenovité napětí	24 V
Jmenovitý proud	20 A
Jmenovité otáčky	2800 ot/min

Další hodnoty motoru (změřeno, katalogové hodnoty):

Odpor kotvy	$R_{ac} = 0,115 \Omega$
Indukčnost kotvy	$L_{ac} = 0,306 \text{ mH}$
Moment setrvačnosti	$J_m = 0,00125 \text{ kg m}^2$

Přepočet jmenovitých otáček motoru z ot/min na rad/s.

$$\omega_n [\text{rad/s}] = \frac{n_n [\text{ot/min}]}{60} * 2 * \pi \quad (2.31)$$

$$\omega_n = \frac{2800}{60} * 2 * \pi$$

$$\omega_n = 293,21 \text{ rad/s}$$

Stejnoseměrný motor s permanentními magnety typu PM80S/2 obsahuje dva uhlíkové kartáče, kdy na jeden styk přichází úbytek napětí mezi kartáčem a komutátorem 0,3 V. [6]

$$\Delta U_{kn} = 2 * 0,3 \quad (2.32)$$

$$\Delta U_{kn} = 0,6 \text{ V}$$

Mezi jmenovitým indukovaným napětím a jmenovitým svorkovým napětím platí vztah:

$$U_{in} = U_{an} - R_{ac} * I_{acn} - \Delta U_{kn} \quad (2.33)$$

$$U_{in} = 24 - 0,115 * 20 - 0,6$$

$$U_{in} = 21,1 \text{ V}$$

Pro jmenovité indukované napětí dále platí:

$$U_{in} = \omega_n * c\phi \Rightarrow c\phi = \frac{U_{in}}{\omega_n} \quad (2.34)$$

Elektromagnetická konstanta stroje je pak:

$$c\phi = \frac{21,1}{293,21}$$

$$c\phi = 0,07196 \text{ Vs}$$

Jmenovitý příkon se rovná součinu jmenovitého napětí a jmenovitého proudu:

$$P_{pn} = U_{an} * I_{acn} \quad (2.35)$$

$$P_{pn} = 24 * 20$$

$$P_{pn} = 480 \text{ W}$$

Jmenovitá účinnost motoru vychází z poměru jmenovitého mechanického výkonu a jmenovitého elektrického příkonu:

$$\eta_{mn} = \frac{P_{mn}}{P_{pn}} * 100 \quad (2.36)$$

$$\eta_{mn} = \frac{400}{480} * 100$$

$$\eta_{mn} = 83,33 \%$$

Jmenovitý elektromagnetický moment stroje je úměrný součinu elektromagnetické konstanty stroje a jmenovitého proudu kotvy:

$$M_{en} = c\phi * I_{acn} \quad (2.37)$$

$$M_{en} = 0,07196 * 20$$

$$M_{en} = 1,439 \text{ Nm}$$



Moment, který je přiveden na vstup převodovky z hřídele motoru se nazývá jmenovitý mechanický moment motoru.

$$M_{mn} = \frac{P_{mn}}{\omega_n} \quad (2.38)$$

$$M_{mn} = \frac{400}{293,21}$$

$$M_{mn} = 1,3642 \text{ Nm}$$

## 2.4 Ztráty v motoru

V elektrickém pohonu dochází k přeměně elektrické energie na energii pohybovou (motorický režim), při brzdění dochází k opačnému jevu (generátorový režim). Tato přeměna energie je spojena se vznikem ztrát a tedy s určitou účinností. Ke vzniku ztrát dochází ve všech provozních stavech, tedy v ustálených i přechodových dějích. [5] Tato diplomová práce se zabývá zjištěním efektivity této elektromechanické přeměny energie - zjišťuje účinnost přeměny a ztráty energie.

### 2.4.1 Určení jmenovitých ztrát v motoru

Jmenovité ztráty v motoru jsou dány jmenovitou účinností motoru.

$$\eta_{mn} = \frac{P_{mn}}{P_{mn} + \Delta P_n} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta P_n}{P_{mn}}} \quad (2.401)$$

Po matematické úpravě se vyjádří jmenovité ztráty v motoru:

$$\Delta P_n = P_{mn} * \frac{1 - \eta_{mn}}{\eta_{mn}} \quad (2.402)$$

$$\Delta P_n = 400 * \frac{1 - 0.8333}{0.8333}$$

$$\Delta P_n = 80 \text{ W}$$

Tyto vzniklé jmenovité ztráty v motoru lze rozdělit na jmenovité ztráty závislé na zatížení  $\Delta P_{vn}$  a na jmenovité stále ztráty naprázdno  $\Delta P_{0n}$ .

$$\Delta P_n = \Delta P_{vn} + \Delta P_{0n} \quad (2.403)$$

$$80 \text{ W} = \Delta P_{vn} + \Delta P_{0n}$$

### 2.4.2 Jmenovité ztráty závislé na zatížení

Jmenovité ztráty závislé na zatížení se dělí na: [6]

- jmenovité Joulovy ztráty  $\Delta P_{jn}$
- jmenovité ztráty na kartáči  $\Delta P_{kn}$
- jmenovité ztráty v budícím obvodě  $\Delta P_{bn}$

$$\Delta P_{vn} = \Delta P_{jn} + \Delta P_{kn} + \Delta P_{bn} \quad (2.404)$$

#### Jmenovité Joulovy ztráty:

Tyto ztráty jsou dominantní a vznikají průchodem jmenovitého zatěžovacího proudu  $I_{acn}$  ve vinutí kotvy. [6]

$$\Delta P_{jn} = I_{acn}^2 * R_{ac} \quad (2.405)$$

$$\Delta P_{jn} = 20^2 * 0,115$$

$$\Delta P_{jn} = 46 \text{ W}$$

#### Jmenovité ztráty na kartáči:

Ztráty vznikají průchodem proudu přes stykové plochy kartáče a komutátoru. Jsou dané součinem jmenovitého proudu a úbytku napětí v přechodové vrstvě, která se uvažuje jako nezávislá od proudu a polaritě kartáče.

$$\Delta P_{kn} = \Delta U_{kn} * I_{acn} \quad (2.406)$$

$$\Delta P_{kn} = 0.6 * 20$$

$$\Delta P_{kn} = 12 \text{ W}$$

#### Jmenovité ztráty v budícím obvodě:

Ztráty v budícím obvodě jsou tvořené průchodem jmenovitého budícího proudu v budícím vinutí. Ztráty v budícím obvodě se vlivem permanentních magnetů v této práci neuplatňují.

$$\Delta P_{bn} = 0 \text{ W} \quad (2.407)$$

#### Výpočet celkových jmenovitých ztrát závislých na zatížení:

$$\Delta P_{vn} = \Delta P_{jn} + \Delta P_{kn} + \Delta P_{bn} \quad (2.408)$$

$$\Delta P_{vn} = 46 + 12 + 0$$

$$\Delta P_{vn} = 58 \text{ W}$$

### 2.4.3 Jmenovité stálé ztráty naprázdno

Jmenovité stálé ztráty naprázdno  $\Delta P_{0n}$  jsou nezávislé na zatížení (proudu) a dělí se na: [6]

- jmenovité ztráty v železe  $\Delta P_{fen}$
- jmenovité mechanické ztráty  $\Delta P_{mn}$
- jmenovité přídatné ztráty  $\Delta P_{adn}$

$$\Delta P_{0n} = \Delta P_{fen} + \Delta P_{mn} + \Delta P_{adn} \quad (2.409)$$

Po odečtení jmenovitých ztrát závislých na zatížení od jmenovitých ztrát motoru zůstanou ztráty, které reprezentují jmenovité stálé ztráty naprázdno.

$$\Delta P_{0n} = \Delta P_n - \Delta P_{vn} \quad (2.410)$$

$$\Delta P_{0n} = 80 - 58$$

$$\Delta P_{0n} = 22 \text{ W}$$

Jmenovité přídatné ztráty:

Přídatné ztráty jsou všechny ostatní ztráty, které zde nejsou popsány. Jsou způsobené například vířivými proudy v aktivních i konstrukčních částech stroje a rozptylovými póly vytvořenými zatěžovacím proudem. Jmenovité přídatné ztráty jsou definované ve jmenovitém stavu jako určitá část elektrického výkonu stroje - příkon motoru nebo výkon generátoru. Dosahují u nekompenzovaných strojů přibližně 1% jmenovitého elektrického výkonu stroje. Tyto ztráty jsou velmi malé a jsou těžko definované v přechodových dějích, proto budou v této práci zanedbány.

Jmenovité ztráty v železe:

Jmenovité ztráty v železe se považují za nezávislé na zatížení - jsou způsobeny přemagnetováním železného jádra kotvy, ztráty vířivými proudy železného jádra vyvoleným pulzacemi magnetického pole při chodě nezatíženého motoru. [6] Poměr mezi jmenovitými ztrátami v železe a jmenovitými ztrátami mechanickými není jednoznačně definován. Proto ztráty v železe byly zvoleny jako 2/3 jmenovitých stálých ztrát naprázdno.

$$\Delta P_{fen} = \frac{2}{3} * \Delta P_{0n} \quad (2.411)$$

$$\Delta P_{fen} = \frac{2}{3} * 22$$

$$\Delta P_{fen} = 14,67 \text{ W}$$

Jmenovité ztráty v železe se dále dělí na jmenovité ztráty vířivými proudy  $\Delta P_{vpn}$  a jmenovité ztráty hysterezní  $\Delta P_{hn}$ .

$$\Delta P_{fen} = \Delta P_{vpn} + \Delta P_{hn} \quad (2.412)$$

$$14,67 = \Delta P_{vpn} + \Delta P_{hn}$$

Jejich poměr opět nelze jednoznačně definovat, proto byl zvolen poměr těchto ztrát 1:1.

Jmenovité ztráty vířivými proudy  $\Delta P_{vpn}$ :

$$\Delta P_{vpn} = \frac{1}{2} * \Delta P_{fen} \quad (2.413)$$

$$\Delta P_{vpn} = \frac{1}{2} * 14,67$$

$$\Delta P_{vpn} = 7,335 \text{ W}$$

Jmenovité ztráty hysterezní  $\Delta P_{hn}$ :

$$\Delta P_{hn} = \frac{1}{2} * \Delta P_{fen} \quad (2.414)$$

$$\Delta P_{hn} = \frac{1}{2} * 14,67$$

$$\Delta P_{hn} = 7,335 \text{ W}$$

Jmenovité mechanické ztráty:

Po odečtení jmenovitých ztrát v železe od jmenovitých stálých ztrát naprázdno vyjdou jmenovité mechanické ztráty.

Jmenovité ztráty mechanické  $\Delta P_{mn}$ :

$$\Delta P_{mn} = \Delta P_{0n} - \Delta P_{fen} \quad (2.415)$$

$$\Delta P_{mn} = 22 - 14,67$$

$$\Delta P_{mn} = 7,33 \text{ W}$$

Jmenovité ztráty mechanické se skládají ze jmenovitých ztrát způsobených třením v ložiskách  $\Delta P_{tn}$  a jmenovitých ztrát aerodynamických  $\Delta P_{an}$ . Poměr těchto ztrát byl zvolen 1:1. Při pomalém pohybu převládají třecí ztráty, při rychlém pohybu převládají aerodynamické ztráty („tření“ o vzduch a ztráty ventilátoru).

$$\Delta P_{mn} = \Delta P_{tn} + \Delta P_{an} \quad (2.416)$$

$$7,33 = \Delta P_{tn} + \Delta P_{an}$$

Jmenovité ztráty třením v ložiskách  $\Delta P_{tn}$ :

$$\Delta P_{tn} = \frac{1}{2} * \Delta P_{mn} \quad (2.417)$$

$$\Delta P_{tn} = \frac{1}{2} * 7,33$$

$$\Delta P_{tn} = 3,665 \text{ W}$$

Jmenovité ztráty aerodynamické  $\Delta P_{an}$ :

$$\Delta P_{an} = \frac{1}{2} * \Delta P_{mn} \quad (2.418)$$

$$\Delta P_{an} = \frac{1}{2} * 7,33$$

$$\Delta P_{an} = 3,665 \text{ W}$$

#### 2.4.4 Určení ztrát motoru v obecném pracovním bodě

Při určování ztrát v kterémkoliv pracovním bodě se vychází z vypočtených jmenovitých hodnot, kdy ztráty závislé na zatížení jsou vypočítány z kotevního proudu motoru a stále ztráty naprázdno jsou závislé na otáčkách motoru.

Joulové ztráty:

$$\frac{\Delta P_j}{\Delta P_{jn}} = \frac{I_{ac}^2}{I_{acn}^2} \Rightarrow \Delta P_j = \Delta P_{jn} * \frac{I_{ac}^2}{I_{acn}^2} = k_j * I_{ac}^2 \quad (2.419)$$

$$\Delta P_j = 46 * \frac{I_{ac}^2}{20^2}$$

$$\Delta P_j = 0,115 * I_{ac}^2 \text{ [W]}$$

Ztráty na kartáči:

$$\frac{\Delta P_k}{\Delta P_{kn}} = \frac{I_{ac}}{I_{acn}} \Rightarrow \Delta P_k = \Delta P_{kn} * \frac{I_{ac}}{I_{acn}} = k_k * I_{ac} \quad (2.420)$$

$$\Delta P_k = 12 * \frac{I_{ac}}{20}$$

$$\Delta P_k = 0,6 * I_{ac} \text{ [W]}$$

Ztráty vířivými proudy:

$$\frac{\Delta P_{vp}}{\Delta P_{vpn}} = \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \Rightarrow \Delta P_{vp} = \Delta P_{vpn} \frac{\omega^2}{\omega_n^2} = k_{vp} * \omega^2 \quad (2.421)$$

$$\Delta P_{vp} = 7,335 * \frac{\omega^2}{293.21^2}$$

$$\Delta P_{vp} = 85,318 * 10^{-6} * \omega^2 \text{ [W]}$$

Ztráty hysterezní:

$$\frac{\Delta P_h}{\Delta P_{hn}} = \frac{\omega}{\omega_n} \Rightarrow \Delta P_h = \Delta P_{hn} * \frac{\omega}{\omega_n} = k_h * \omega \quad (2.422)$$

$$\Delta P_h = 7,335 * \frac{\omega}{293.21}$$

$$\Delta P_h = 25,016 * 10^{-3} * \omega \text{ [W]}$$

Ztrát třením v ložiskách:

$$\frac{\Delta P_t}{\Delta P_{tn}} = \frac{\omega}{\omega_n} \Rightarrow \Delta P_t = \Delta P_{tn} * \frac{\omega}{\omega_n} = k_t * \omega \quad (2.423)$$

$$\Delta P_t = 3,665 * \frac{\omega}{293.21}$$

$$\Delta P_t = 12,449 * 10^{-3} * \omega \text{ [W]}$$

Ztráty aerodynamické:

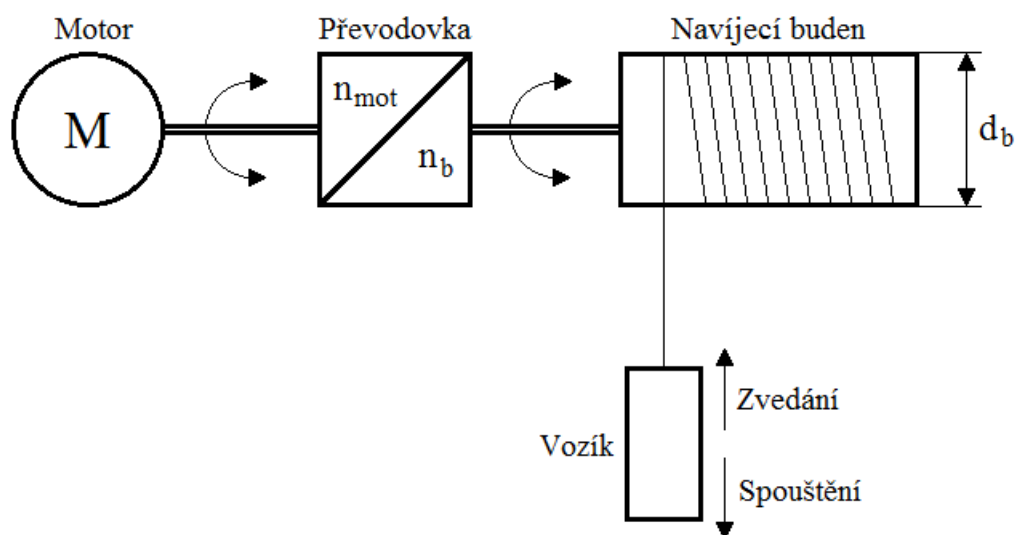
$$\frac{\Delta P_a}{\Delta P_{an}} = \frac{\omega^3}{\omega_n^3} \Rightarrow \Delta P_a = \Delta P_{an} \frac{\omega^3}{\omega_n^3} = k_a * \omega^3 \quad (2.424)$$

$$\Delta P_a = 3,665 * \frac{\omega^3}{293.21^3}$$

$$\Delta P_a = 0,1454 * 10^{-6} * \omega^3 \text{ [W]}$$

## 2.5 Pracovní mechanismus

Motor je propojen s pracovním mechanismem pomocí navíjecího bubnu a převodovky, která má převodový poměr  $i = 30$ . Pracovní mechanismus tvoří nákladní vozík, který motor bude zvedat a spouštět (obr. 13). Tento vozík má hmotnost 22,764 kg. Do vozíku bude dáno závaží jako náklad o hmotnosti 30 kg. Celková hmotnost zatíženého vozíku  $m_v$  je 52,764 kg. Navíjecí buben má průměr 46 mm.



Obr. 13. Zjednodušené kinematické schéma pohonu.

Na vozík bude působit tíhová síla:

$$F_G = m_v * g \quad (2.51)$$

$$F_G = 52,764 * 9,81$$

$$F_G = 517,62 \text{ N}$$

Výpočet momentu pracovního mechanismu:

$$M_{pm} = F_G * \frac{d_b}{2} \quad (2.52)$$

$$M_{pm} = 517,62 * \frac{0,046}{2}$$

$$M_{pm} = 11,9 \text{ Nm}$$

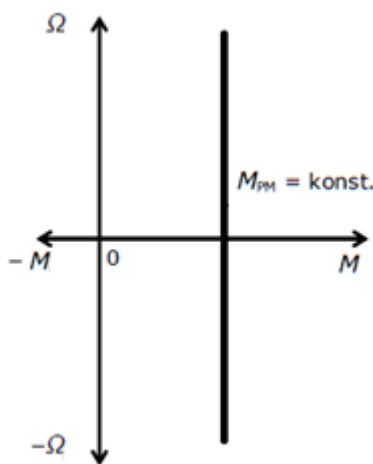
Výpočet momentu pracovního mechanismu přepočítaného na hřídel motoru bez zahrnutí ztrát v převodovce: [5]

$$M_{pr} = M_{pm} * \frac{1}{i} \quad (2.53)$$

$$M_{pr} = 11,9 * \frac{1}{30}$$

$$M_{pr} = 0,3968 \text{ Nm}$$

Tento zatěžovací moment je potenciální (aktivní charakter) - to znamená, že při kladných otáčkách (zvedání) bude působit proti momentu motoru a při záporných otáčkách (spouštění) bude působit ve směru momentu motoru. Moment nemění znaménko v závislosti na směru otáčení (obr. 14). [4]



Obr. 14. Potenciální zatěžovací moment. [4]

## 2.6 Ztráty v převodovce

Účinnost převodovky  $\eta_p$  je úměrná předávanému zatížení  $M_{pm}$ . [5]

$$\eta_p = \frac{M_{pm}}{M_{pm} + a * M_n + b * M_{pm}} \quad (2.61)$$

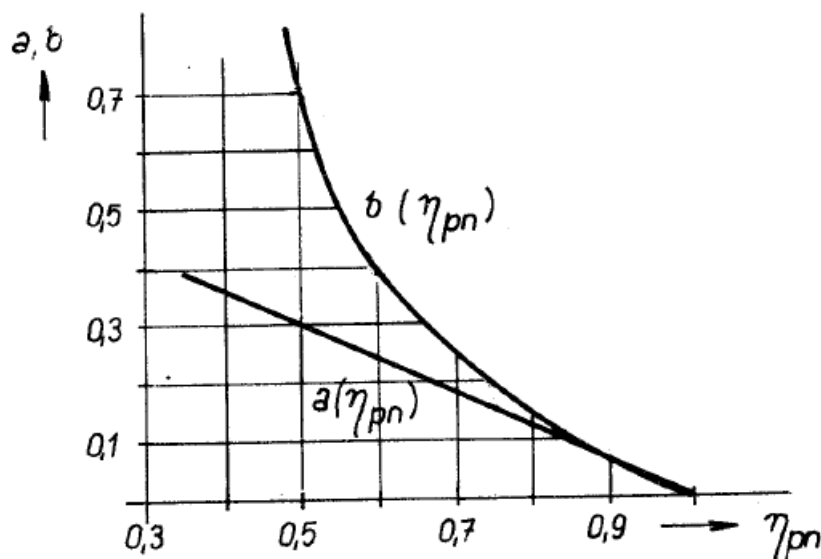
### 2.6.1 Určení jmenovitých ztrát v převodovce

V této práci má převodovka jmenovitou účinnost 66 % a jmenovitý moment převodovky  $M_n$  je 2 Nm. Jmenovité ztráty v převodovce  $\Delta M_n$  se dělí na jmenovité ztráty konstantní  $\Delta M_{kn}$  a jmenovité ztráty variabilní  $\Delta M_{vn}$ .

$$\Delta M_n = \Delta M_{kn} + \Delta M_{vn} \quad (2.62)$$



Z grafu na obr. 15 se pomocí jmenovité účinnosti převodovky  $\eta_{pn}$  určí činitel konstantních ztrát ( $a = 0,21$ ) a činitel proměnlivých ztrát ( $b = 0,305$ ).



Obr. 15. Závislost koeficientů konstantních a proměnlivých ztrát na jmenovité účinnosti převodu. [5]

Jmenovité ztráty konstantní se rovnají součinu činitele konstantních ztrát a jmenovitého momentu převodovky.

$$\Delta M_{kn} = a * M_n \quad (2.63)$$

$$\Delta M_{kn} = 0,21 * 2$$

$$\Delta M_{kn} = 0,42 \text{ Nm}$$

Jmenovité ztráty variabilní se vypočtou jako součin činitele variabilních ztrát a maximálního (jmenovitého) zatěžovacího momentu převodovky. Tento moment předává převodovka pracovnímu mechanismu.

$$\Delta M_{vn} = b * M_{pmn} \quad (2.64)$$

$$\Delta M_{vn} = 0,305 * 2$$

$$\Delta M_{vn} = 0,61 \text{ Nm}$$

Celkový jmenovitý ztrátový moment v převodovce:

$$\Delta M_n = \Delta M_{kn} + \Delta M_{vn} \quad (2.65)$$

$$\Delta M_n = 0,42 + 0,61$$

$$\Delta M_n = 1,03 \text{ Nm}$$

### 2.6.2 Určení ztrát v převodovce v obecném pracovním bodě

Na rozdíl od konstantních ztrát v převodovce, které jsou v celém rozsahu zatěžovacího momentu stejné, jsou variabilní ztráty v převodovce závislé na momentu pracovního mechanismu přepočítaného na hřídel motoru.

Výpočet konstantních ztrát:

$$\Delta M_k = \Delta M_{kn} = a * M_n \quad (2.66)$$

$$\Delta M_k = 0,21 * 2$$

$$\Delta M_k = 0,42 \text{ Nm}$$

Výpočet variabilních ztrát:

$$\Delta M_v = b * M_{pr} \quad (2.67)$$

$$\Delta M_v = 0,305 * 0,3968$$

$$\Delta M_v = 0,121 \text{ Nm}$$

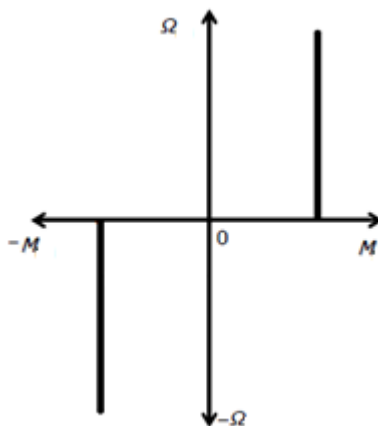
Výpočet celkového ztrátového momentu v převodovce pro vozík o celkové hmotnosti 52,76 kg.

$$\Delta M = \Delta M_k + \Delta M_v \quad (2.68)$$

$$\Delta M = 0,42 + 0,121$$

$$\Delta M = 0,541 \text{ Nm}$$

Na ztrátový moment v převodovce můžeme pohlížet jako na reakční zatěžovací moment (pasivní charakter) - působí vždy proti momentu motoru. Moment mění své znaménko při změně směru otáčení (obr. 16). [4]



Obr. 16. Reakční zatěžovací moment. [4]

Účinnost převodovky pro moment pracovního mechanismu přepočítaný na hřídel motoru.

$$\eta_p = \frac{M_{pr}}{M_{pr} + \Delta M} \quad (2.69)$$

$$\eta_p = \frac{0.3968}{0.3968 + 0.541}$$

$$\eta_p = 0.4231$$

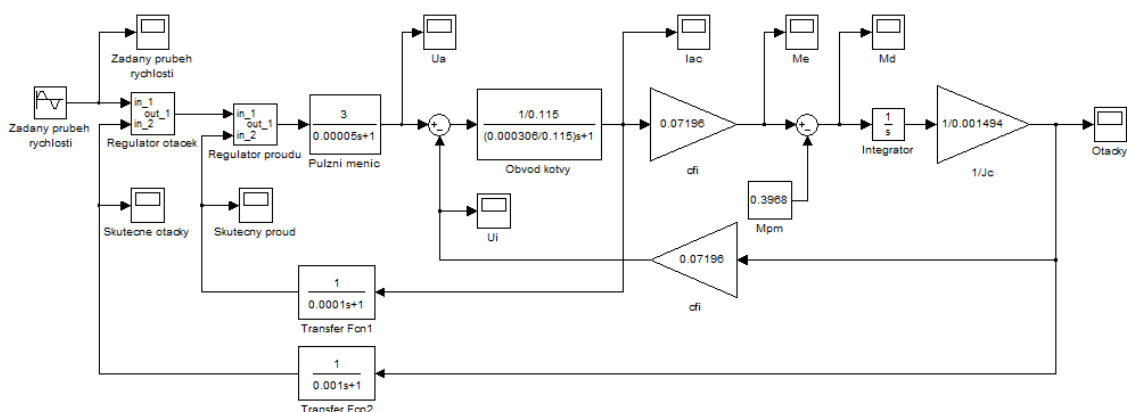
Účinnost převodovky pro plně naložený vozík je 42,31 %.

### 3. Sestavení simulačního modelu DC pohonu s uvažováním ztrát v motoru a převodovce

Sestavený kompletní simulační model regulovaného DC pohonu s uvažováním ztrát v motoru a převodovce je uveden v příloze.

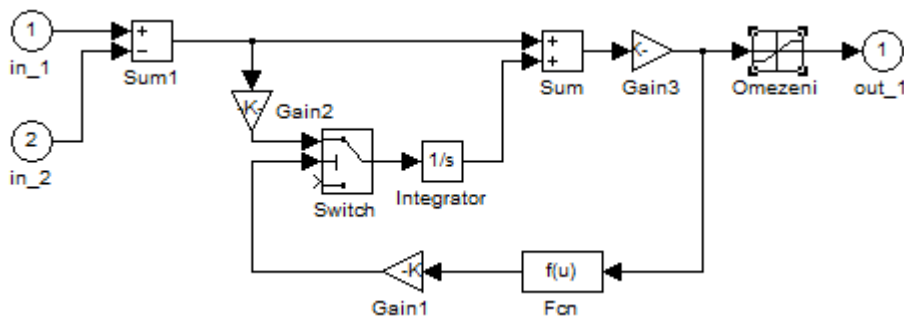
#### 3.1 Sestavení simulačního modelu DC pohonu s regulací rychlosti a podřazenou smyčkou proudu

Při vytvoření simulačního modelu regulovaného DC pohonu se vychází z obr. 8, kde je blokově naznačená struktura motoru. Dále na obr. 6 je blokově naznačena regulace rychlosti s podřazenou smyčkou proudu. Do jednotlivých bloků se zadají vypočtené a zadané hodnoty, které vycházejí z teoretického rozboru regulace rychlosti s podřazenou smyčkou proudu.



Obr. 17. Simulační model DC pohonu s regulací rychlosti a podřazenou smyčkou proudu.

Blok regulátor otáček a regulátor proudu je realizován pomocí simulačního modelu PI regulátoru (obr. 18). Jeden z požadavků je dodržet podmínku, aby maximální kotevní proud dosahoval 1,5 násobku proudu jmenovitého. Maximální kotevní proud je pak 30A. Toto omezení proudu se nastaví v regulátoru otáček v bloku omezení, kde se nastaví hodnota na +30 A a -30 A. V regulátoru proudu se nastaví maximální omezení řídicího napětí na hodnotu +8 V a -8 V.



Obr. 18. Simulační model PI regulátoru otáček (proudu).

Přenos regulátoru proudu (metoda optimálního modulu):

$$F_{RI(p)} = 0,3296 * \frac{1 + 0,00266p}{0,00266p} \quad (3.11)$$

Přenos regulátoru rychlosti (metoda symetrické optimum):

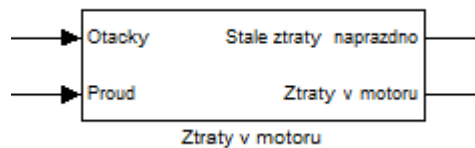
$$F_{RI(p)} = 7,9318 * \frac{1 + 0,0052p}{0,0052p} \quad (3.12)$$

Přenos pulzního měniče:

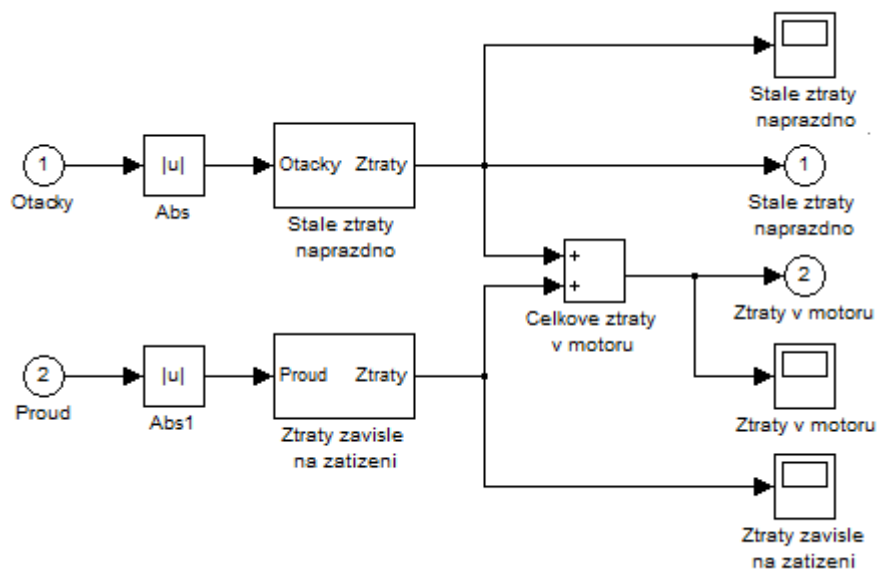
$$F_{PM(p)} = \frac{3}{1 + 0,00005p} \quad (3.13)$$

### 3.2 Vytvoření simulačního bloku ztráty v motoru

Simulační model na obr. 17 se rozšíří o blok ztráty v motoru (obr. 19), ve kterém se počítají stálé ztráty naprázdno a ztráty závislé na zatížení (obr. 20). Do bloku vstupuje kotevní proud a otáčky motoru. Tyto veličiny se počítají v absolutní hodnotě, aby výstupní ztráty v motoru byly větší než nula.



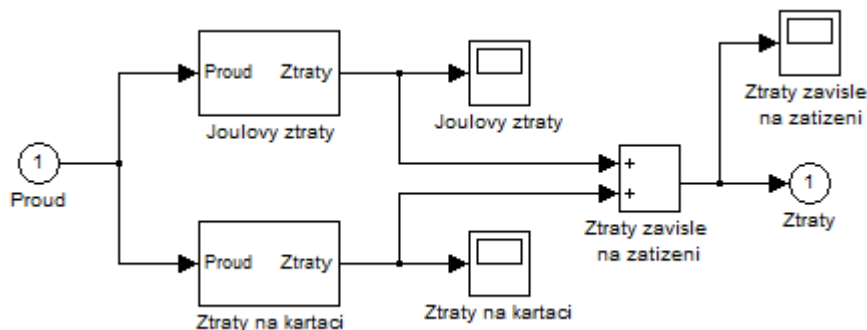
Obr. 19. Blok pro výpočet ztrát v motoru.



Obr. 20. Struktura bloku ztráty v motoru.

### 3.2.1 Vytvoření simulačního bloku ztrát závislých na zatížení

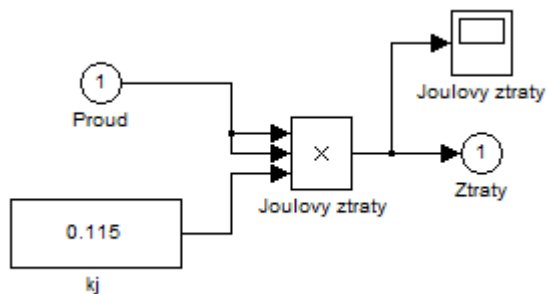
Do tohoto bloku vstupuje kotevní proud. Výsledné ztráty závislé na zatížení se skládají ze součtu Joulových ztrát a ztrát na kartáči.



Obr. 21. Struktura bloku ztrát závislých na zatížení.

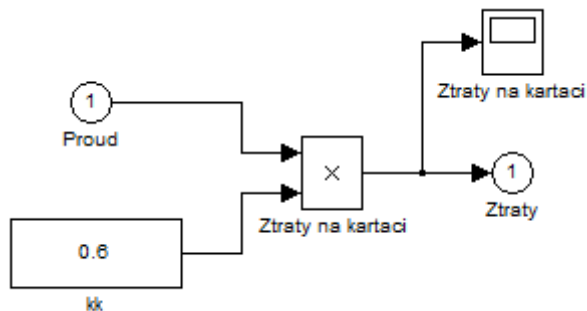
Pro konkrétní simulační bloky jednotlivých ztrát se vychází z rovnic pro výpočet ztrát motoru v obecném pracovním bodě (rovnice 2.419 - 2.424), které byly odvozeny v předchozí kapitole.

Blok pro výpočet Joulových ztrát - rovnice 2.419:



Obr. 22. Blok pro výpočet Joulových ztrát.

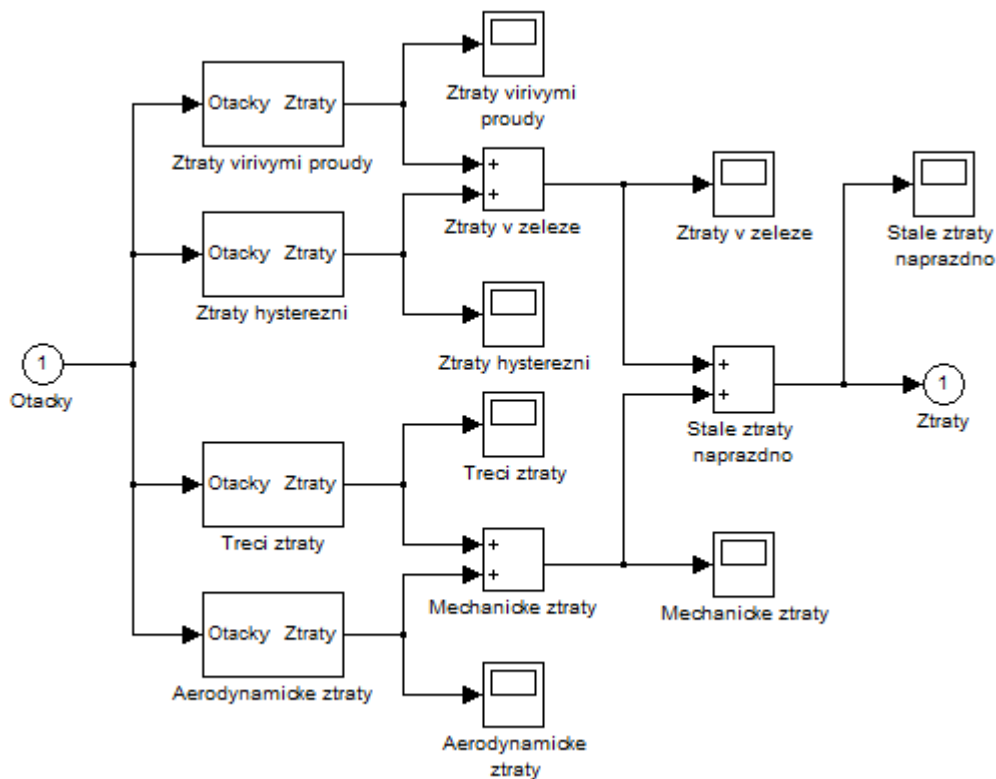
Blok pro výpočet ztrát na kartáči - rovnice 2.420:



Obr. 23. Blok pro výpočet ztrát na kartáči.

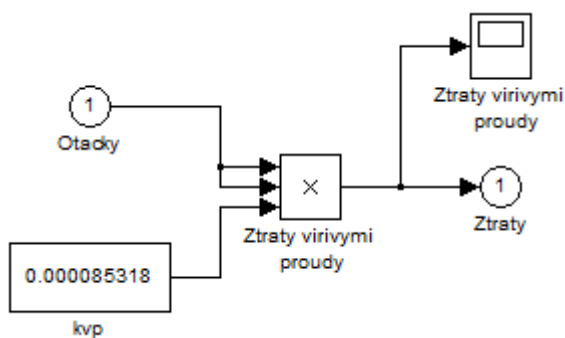
### 3.2.2 Vytvoření simulačního bloku stálých ztrát naprázdno

Vstupem do bloku stálých ztrát naprázdno jsou otáčky motoru, na kterých jsou tyto ztráty závislé. Výstup je tvořen součtem jednotlivých konkrétních ztrát.



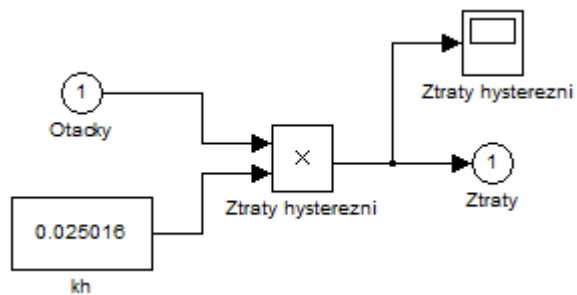
Obr. 24. Struktura bloku pro výpočet stálých ztrát naprázdno.

Struktura bloku pro výpočet ztrát vlivem vířivých proudů - rovnice 2.421:



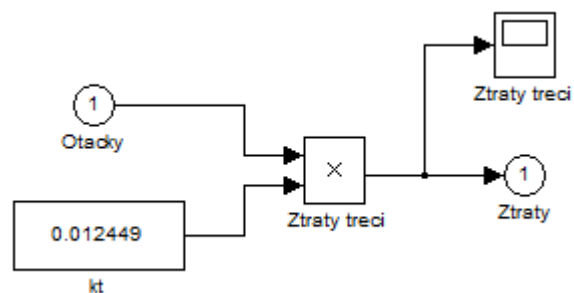
Obr. 25. Struktura bloku pro výpočet ztrát vlivem vířivých proudů.

Struktura bloku pro výpočet ztrát vlivem hystereze - rovnice 2.422:



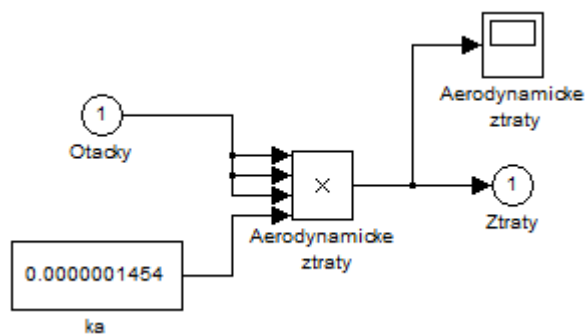
Obr. 26. Struktura bloku pro výpočet ztrát vlivem hystereze.

Struktura bloku pro výpočet třecích ztrát - rovnice 2.423:



Obr. 27. Struktura bloku pro výpočet třecích ztrát.

Struktura bloku pro výpočet aerodynamických ztrát - rovnice 2.424:



Obr. 28. Struktura bloku pro výpočet aerodynamických ztrát.



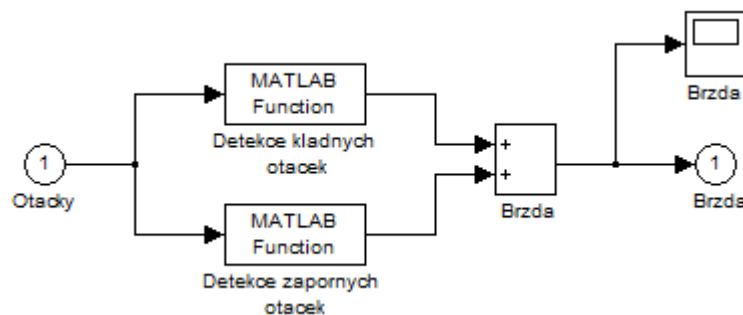
### 3.3 Vytvoření bloku simulace brzdy

Tento simulační model obsahuje i blok, který simuluje funkci brzdy (obr. 29). Pokud jsou detekovány nulové otáčky, mechanická nebo elektromagnetická brzda zabrzdí motor. To v simulaci znamená, že všechny ztrátové momenty a moment pracovního mechanismu jsou nulové. Motorem nebude procházet žádný kotevní proud.



Obr. 29. Blok pro simulaci brzdy.

Vstupem do bloku simulace brzdy jsou otáčky, které se budou porovnávat s nulovou hodnotou. Při detekci nulového pohybu hřídele motoru přichází na výstup bloku brzdy nulová hodnota. V případě nenulových otáček je na výstupu jednička. Z důvodu malého kolísání otáček kolem nuly nelze jednoznačně definovat, kdy má brzda působit, proto bylo vytvořeno toleranční pásmo kolem nuly. Pokud se otáčky motoru budou pohybovat v rozmezí -0,5 rad/s až +0,5 rad/s brzda bude aktivní. Výpis z m-file pro detekci kladných nebo záporných otáček je v příloze.



Obr. 30. Struktura bloku pro simulaci brzdy.

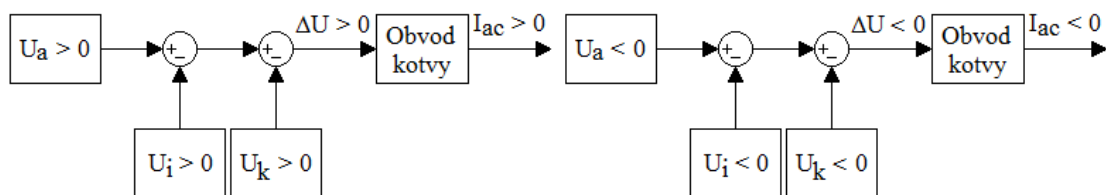
### 3.4 Simulace napěťové rovnice

Pokud motor pracuje v motorickém režimu, platí pro něj napěťová rovnice, která říká, že napětí indukované se rovná napětí svorkovému poníženému o úbytek napětí vlivem Joulových ztrát a úbytku napětí mezi kartáči a komutátorem. Napětí svorkové je vždy větší než indukované a toto indukované napětí působí proti svorkovému napětí.

Napěťová rovnice pro motor:

$$U_i = U_a - I_{ac} * R_{ac} - \Delta U_k \quad (3.41)$$

V prvním kvadrantu je svorkové napětí větší než nula. Ve třetím kvadrantu je svorkové napětí menší než nula a dochází k opačnému směru otáčení hřídele motoru.

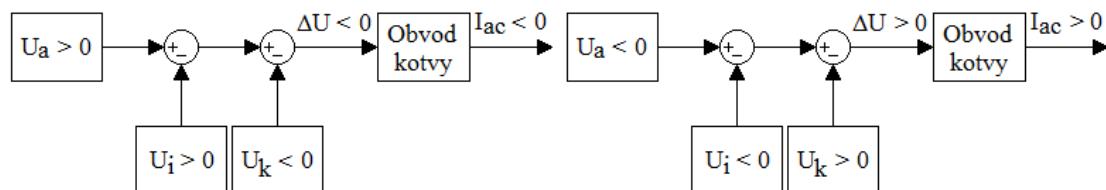


Obr. 31. Polarita napětí a proudu pro první a třetí kvadrant.

Pokud motor pracuje v generátorovém režimu, stává se dynamem - napětí indukované bude větší než napětí svorkové. Opět pro něj platí rovnice, která říká, že napětí indukované se rovná napětí svorkovému poníženému o úbytek napětí vlivem Joulových ztrát a úbytku napětí mezi kartáči a komutátorem.

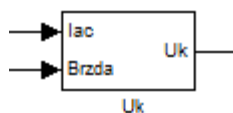
Napěťová rovnice pro generátor:

$$U_a = U_i - I_{ac} * R_{ac} - \Delta U_k \quad (3.42)$$

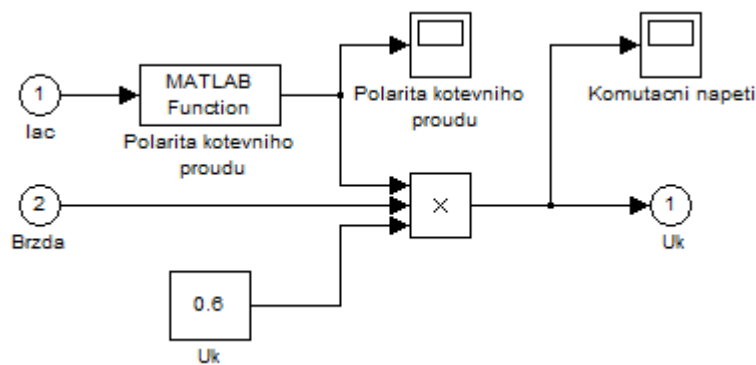


Obr. 32. Polarita napětí a proudu pro druhý a čtvrtý kvadrant.

Z uvedených napěťových rovnic a obr. 31 a obr. 32 lze odvodit, že polarita komutačního napětí má vždy stejný smysl jako kotevní proud  $I_{ac}$ , proto se v simulačním bloku  $U_k$  bude porovnávat, jestli je kotevní proud větší než nula, pak komutační napětí bude +0,6 V. V případě, že je kotevní proud menší než nula je i komutační napětí -0,6 V. Polarita kotevního proudu se detekuje pomocí m-file, který je v příloze. V případě, že je aktivní brzda, na vstup brzdy přichází nula a výsledné komutační napětí je také nulové. Při nenulových otáčkách motoru je na vstup brzdy přivedena jednička a výstup brzda neovlivňuje.

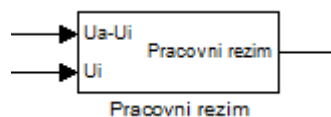


Obr. 33. Blok pro výpočet polarity komutačního napětí.



Obr. 34. Struktura bloku  $U_k$ .

Pro další simulace je potřeba zjistit v jakém režimu motor pracuje (obr. 35). V bloku pracovní režim se zjišťuje, jestli motor pracuje v motorickém nebo generátorovém režimu.



Obr. 35. Blok pro zjištění pracovního režimu motoru.

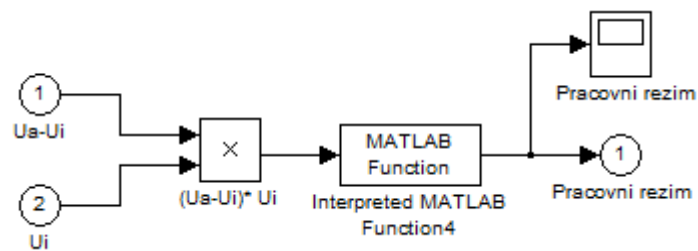
V rovině  $\omega - M$  (obr. 10.) platí, že motor pracuje v motorickém režimu, pokud je mechanický výkon větší než nula. V generátorovém režimu je mechanický výkon menší než nula. V případě, kdy se porovnává mechanický výkon, vzniká algebraická smyčka, proto se pro zjištění režimu bude vycházet z funkce motoru. Pracovní režim se určí porovnáním svorkového napětí s indukovaným napětím. Jak už bylo uvedeno, pro motorický režim platí, že svorkové napětí je větší než indukované.

$$U_a > U_i \quad (3.43)$$

Při generátorovém chodu je indukované napětí větší než svorkové napětí.

$$U_a < U_i \quad (3.44)$$

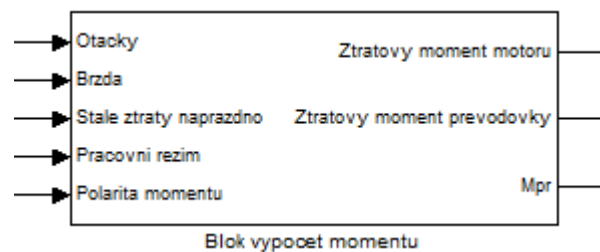
Rozdíl těchto dvou napětí se přivede do bloku zjištění režimu. Pokud je rozdíl větší než nula, jedná se o první kvadrant, při rozdílu menším než nula motor pracuje v druhém kvadrantu. Aby se zajistila detekce všech čtyř kvadrantů, musí se zjistit polarita indukovaného napětí. Pro první a druhý kvadrant zároveň platí, že indukované napětí je kladné. Pokud bude napětí indukované menší než nula a výsledek rozdílu napětí je také menší než nula, motor pracuje v třetím kvadrantu. Při rozdílu napětí větším než nula a indukovaném napětí menším než nula motor pracuje ve čtvrtém kvadrantu. Při motorickém režimu je výstup z bloku pro zjištění pracovního režimu +1 a při generátorovém režimu je výstup -1. Porovnání probíhá pomocí m-file souboru uvedeného v příloze.



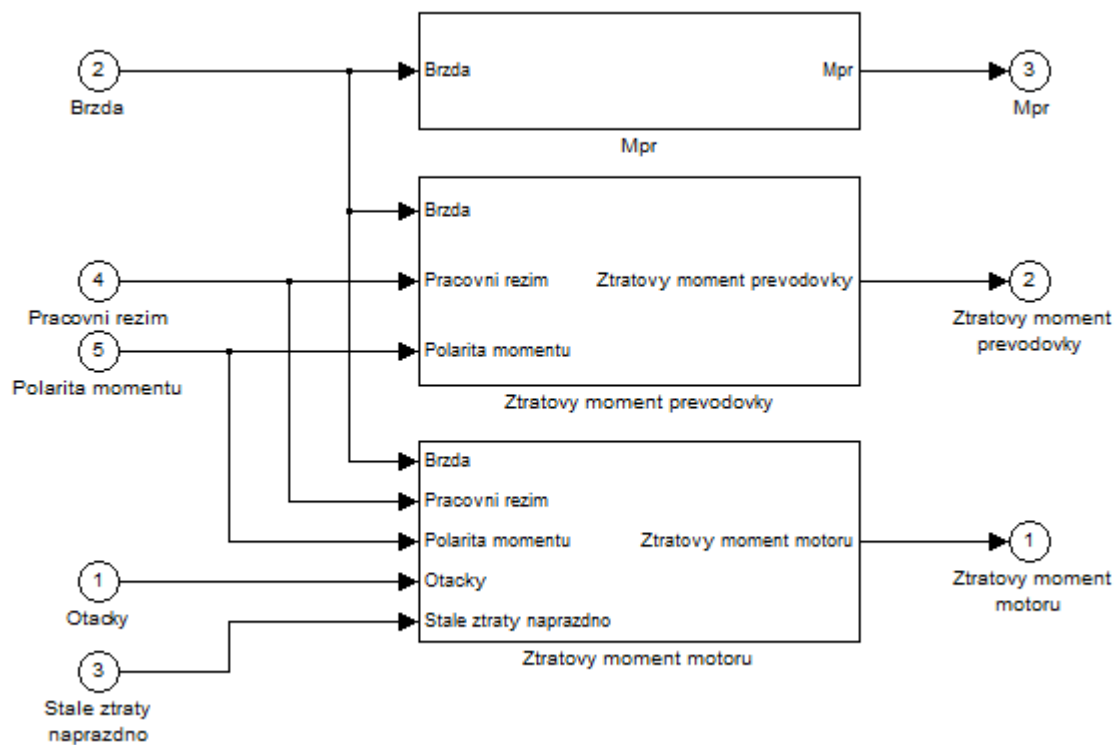
Obr. 36. Struktura bloku pro zjištění pracovního režimu.

### 3.5 Vytvoření simulačního bloku pro výpočet momentů

V tomto bloku se bude počítat ztrátový moment motoru, ztrátový moment převodovky a moment pracovního mechanismu přepočítaný na hřídel motoru (obr. 37).



Obr. 37. Blok pro výpočet momentů.



Obr. 38. Struktura bloku pro výpočet momentů.

### 3.5.1 Vytvoření simulačního bloku ztrátového momentu motoru

Pokud se vynásobí kotevní proud elektromagnetickou konstantou motoru, výsledkem je elektromagnetický moment motoru. Rozdíl mezi jmenovitým elektromagnetickým momentem a jmenovitým mechanickým momentem je jmenovitý ztrátový moment motoru.

$$\Delta M_{mn} = M_{en} - M_{mn} \quad (3.51)$$

$$\Delta M_{mn} = 1,439 - 1,3642$$

$$\Delta M_{mn} = 0,0748 \text{ Nm}$$

Při vynásobení jmenovitého ztrátového momentu motoru jmenovitou rychlostí motoru vyjde část jmenovitých ztrát v motoru, konkrétně jmenovité stále ztráty naprázdno, které už byly vyčísleny při rozboru jmenovitých ztrát v motoru. Tyto ztráty jsou závislé na otáčkách motoru. Ztráty v motoru, které jsou závislé na zatížení (Joulovy ztráty) jsou zahrnuty a počítány v obvodě kotvy.

$$\Delta P_{0n} = \Delta M_{mn} * \omega_n \quad (3.52)$$

$$\Delta P_{0n} = 0,0748 * 293,21$$

$$\Delta P_{0n} = 21,93 \text{ W}$$

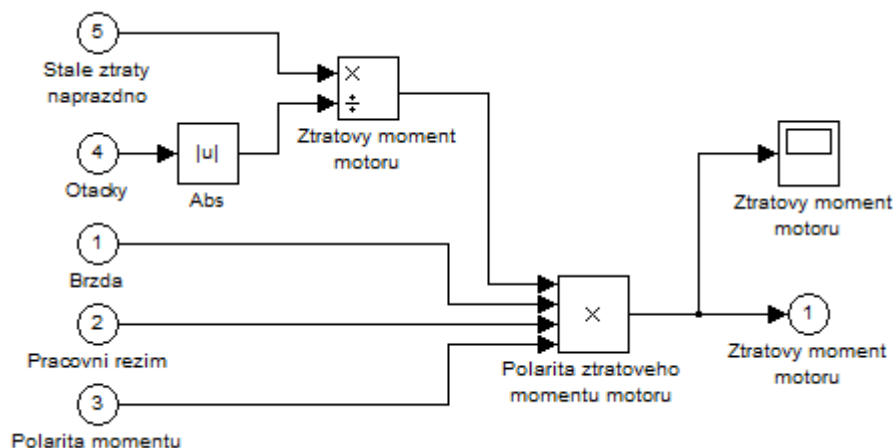
Takto vypočítané jmenovité stále ztráty naprázdno se téměř rovnají 22 W, které byly už vypočítány. Tato drobná nepřesnost vznikla při zaokrouhlování. V případě, že motor bude pracovat v motorickém režimu, bude tento ztrátový moment motoru působit proti elektromagnetickému momentu motoru, výsledný mechanický moment motoru bude menší než elektromagnetický moment motoru.

$$M_m = M_e - \Delta M_m \Rightarrow M_e = M_m + \Delta M_m \quad (3.53)$$

Pokud motor bude pracovat v generátorovém režimu, bude tento ztrátový moment motoru působit příznivě - bude brzdít motor. To znamená, že se bude přičítat k elektromagnetickému momentu motoru, pak mechanický moment motoru bude větší než elektromagnetický moment.

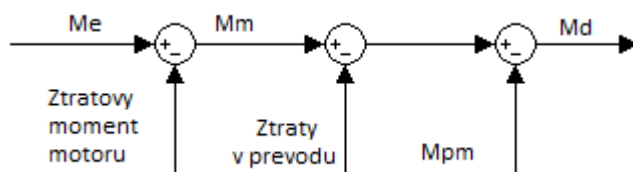
$$M_m = M_e + \Delta M_m \Rightarrow M_e = M_m - \Delta M_m \quad (3.54)$$

Ztrátový moment motoru se vypočítá dělením stálých ztrát naprázdno absolutní hodnotou otáček motoru, tomuto ztrátovému momentu motoru se dále musí přidělit znaménko (obr. 39.), jestli se má přičítat nebo odčítat k elektromagnetickému momentu, podle pracovního režimu v kterém motor pracuje.



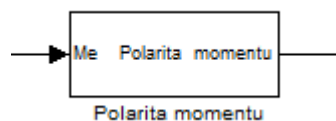
Obr. 39. Struktura bloku ztrátového momentu motoru.

V simulačním modelu se odčítá tento ztrátový moment motoru od elektromagnetického momentu motoru, působí proti (obr. 40 - platí pro první kvadrant). Proto se musí zjistit polarita elektromagnetického momentu motoru.

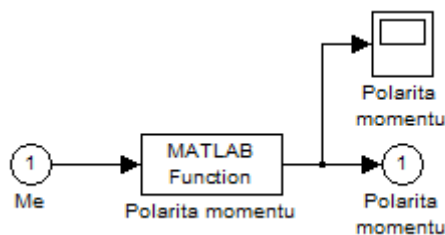


Obr. 40. Odčítání jednotlivých momentů v simulačním modelu.

Pokud je elektromagnetický moment motoru větší než nula, pak je i ztrátový moment motoru větší než nula. Při elektromagnetickém momentu menším než nula je i ztrátový moment motoru menší než nula. Toto znaménko se zjišťuje v bloku polarita momentu pomocí m-file (obr. 42). Výsledek násobení (obr. 39) je ztrátový moment motoru s příslušnou polaritou.



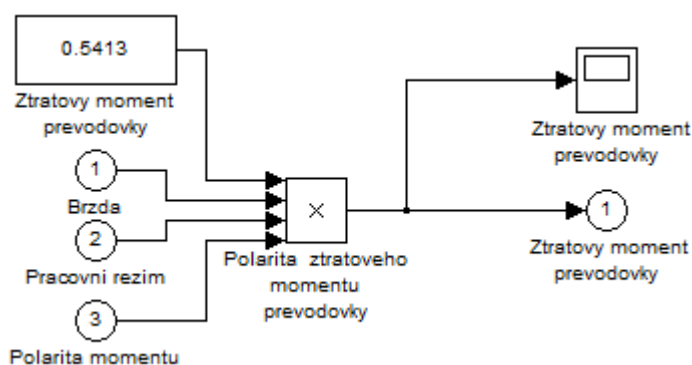
Obr. 41. Blok pro zjištění polarity momentu.



Obr. 42. Struktura bloku zjištění polarity momentu.

### 3.5.2 Vytvoření simulačního bloku ztrátového momentu převodovky

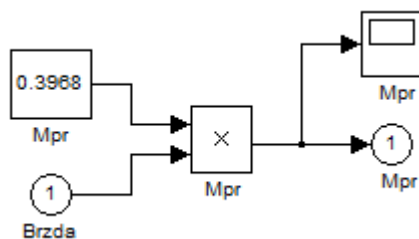
Do bloku výpočtu ztrátového momentu v převodovce vstupuje brzda, pracovní režim a polarita momentu - tyto signály mají stejnou funkci jako v bloku výpočtu ztrátového momentu motoru. Dále je přivedena konstanta - celkový ztrátový moment převodovky, který byl vyčíslen na 0,5413 Nm (rovnice 2.68) pro přepočítaný moment pracovního mechanismu na hřídel motoru 0,3968 Nm.



Obr. 43. Struktura bloku ztrátového momentu v převodovce.

### 3.5.3 Vytvoření simulačního bloku Mpr

Tento blok obsahuje brzdu a konstantu – přepočítaný moment pracovního mechanismu na hřídel motoru pro celkovou hmotnost vozíku 52,764 kg.



Obr. 44. Struktura bloku Mpr.

## 4. Simulační ověření regulovaného DC pohonu

V první podkapitole se simulační ověření provede s plně naloženým vozíkem, který bude motor zdvihát a spouštět. Ve druhé podkapitole se simulace provede s prázdným vozíkem. Vozík se má pohybovat v ustálených stavech při zvedání a spouštění rychlostí 1 m/s. V tab. 1 je srovnání vypočtených hodnot, důležitých pro zadání do simulačního modelu pro prázdný vozík a vozík se závažím 30 kg.

Tab. 1. Změna parametrů pro simulační model při změně zatížení.

	Závaží 0 kg	Závaží 30 kg
$m_v$	22,764 kg	52,764 kg
$M_{pr}$	0,1712 Nm	0,3968 Nm
$\Delta M$	0,472 Nm	0,541 Nm
$\eta_p$	26,61 %	42,31 %
$J_c$	$1,466 \cdot 10^{-3} \text{ kg m}^2$	$1,484 \cdot 10^{-3} \text{ kg m}^2$

Ve třetí podkapitole se pomocí simulačního modelu porovná vykonaná práce a účinnost při zvedání nebo spouštění zatíženého nebo prázdného vozíku.

### 4.1 Zvedání a spouštění plně naloženého vozíku.

Na obr. 13 je zobrazeno zjednodušené kinematické schéma pohonu. Pro požadovanou rychlost vozíku se musí vyjádřit, jak velkou rychlostí se má motor otáčet.

Výpočet otáček motoru pro požadovanou rychlost vozíku  $v = 0,1 \text{ m/s}$ :

$$n_{mot} = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot d_B} \cdot i_p \quad (4.101)$$

$$n_{mot} = \frac{60 \cdot 0,1}{\pi \cdot 0,046} \cdot 30$$

$$n_{mot} = 1245,6 \text{ ot/min}$$

Přepočet požadované rychlosti motoru z ot/min na rad/s.

$$\omega_{mot} \left[ \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] = \frac{n_{mot} [\text{ot/min}]}{60} \cdot 2 \cdot \pi \quad (4.102)$$

$$\omega_{mot} = \frac{1245,6}{60} \cdot 2 \cdot \pi$$

$$\omega_{mot} = 130,44 \text{ rad/s}$$

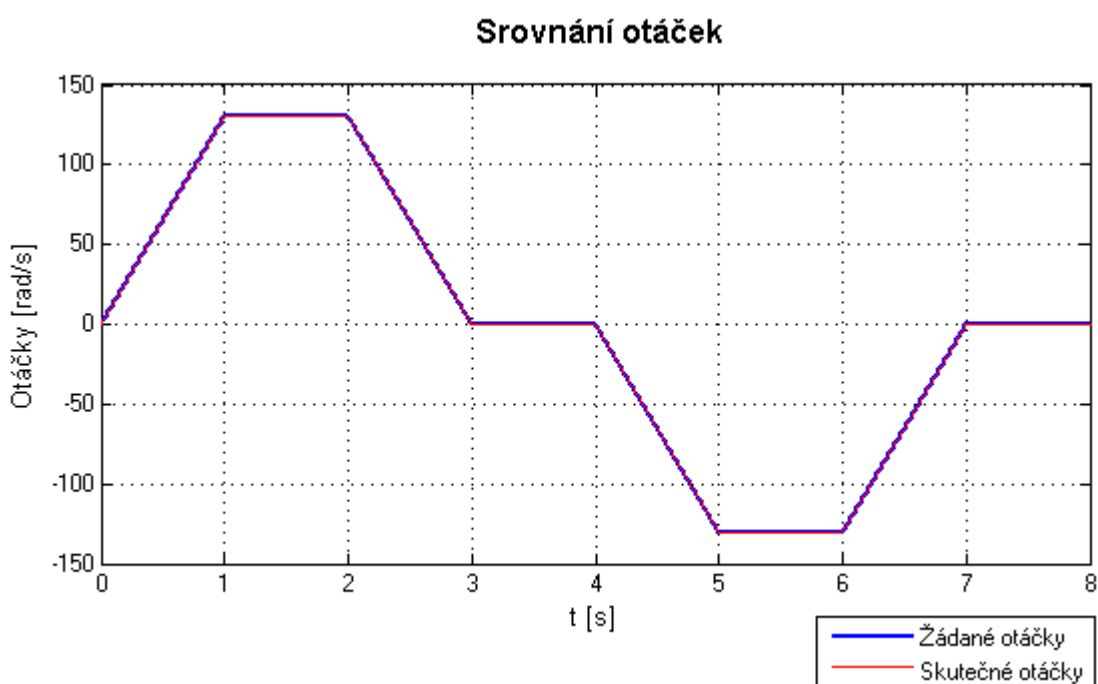


Nastavení hodnot pro požadovaný průběh rychlosti motoru v závislosti na čase je naznačen v tab. 2.

Tab. 2. Požadovaný průběh rychlosti motoru.

	Zvedání vozíku				Spouštění vozíku				
Čas [ s ]	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Žádaná rychlost [ rad/s ]	0	130,4	130,4	0	0	-130,4	-130,4	0	0

Nasimulovaný požadovaný a skutečný průběh rychlosti v závislosti na čase je na obr. 45.



Obr. 45. Zadaný a skutečný průběh rychlosti.

#### 4.1.1 Výpočet celkového momentu setrvačnosti

Pro výpočty rozběhů a dojezdů vozíku se musí vypočítat celkový moment setrvačnosti.

Zadané hodnoty momentu setrvačnosti:

Moment setrvačnosti motoru	$J_m = 0,00125 \text{ kg m}^2$
Moment setrvačnosti převodovky	$J_p = 0,0002 \text{ kg m}^2$
Hmotnost bubnu	$m_b = 5 \text{ kg}$

Celkový moment setrvačnosti se skládá: [7]

$$J_c = J_m + J_p + J_{pr} \quad (4.103)$$

$J_{pr}$  je moment setrvačnosti na výstupní straně převodovky přepočítaný na hřídel motoru - zahrnuje setrvačný moment posuvné hmoty  $J_{mg}$  a setrvačný moment rotační hmoty bubnu  $J_b$ .

Výpočet momentu setrvačnosti posuvné hmoty (vozíku):

$$J_{mg} = m_{GL} * \left(\frac{d_b}{2}\right)^2 \quad (4.104)$$

$$J_{mg} = 52,764 * \left(\frac{0,046}{2}\right)^2$$

$$J_{mg} = 0,0279 \text{ kgm}^2$$

Výpočet momentu setrvačnosti bubnu:

$$J_b = m_b * \left(\frac{d_b}{2}\right)^2 \quad (4.105)$$

$$J_b = 5 * \left(\frac{0,046}{2}\right)^2$$

$$J_b = 2,645 * 10^{-3} \text{ kg m}^2$$

Výpočet momentu setrvačnosti na výstupní straně převodovky přepočítaný na hřídel motoru:

$$J_{pr} = \frac{(J_{mg} + J_b)}{i_p^2} \quad (4.105)$$

$$J_{pr} = \frac{(0,0279 + 2,645 * 10^{-3})}{30^2}$$

$$J_{pr} = 33,939 * 10^{-6} \text{ kgm}^2$$

Celkový moment setrvačnosti:

$$J_c = J_m + J_p + J_{pr} \quad (4.106)$$

$$J_c = 0,00125 + 0,0002 + 33,939 * 10^{-6}$$

$$J_c = 1,484 * 10^{-3} \text{ kgm}^2$$

Momentová rovnice se dá zapsat ve tvaru: [5]

$$M_m = [(1 + b) * M_{pr} + a * M_n] + J_c * \frac{d\omega}{dt} \quad (4.107)$$

$$M_m = [(1 + b) * M_{pr} + a * M_n] + [J_m + J_p + (1 + b) * J_{pr}] * \frac{d\omega}{dt}$$

Do Matlabu se zadává hodnotu celkového momentu setrvačnosti podle předešlé rovnice: [5]

$$J_c = J_m + J_p + (1 + b)J_{pr} \quad (4.108)$$

$$J_c = 0,00125 + 0,0002 + (1 + 0,305) * 33,939 * 10^{-6}$$

$$J_c = 1,494 * 10^{-3} \text{ kgm}^2$$

#### 4.1.2 Určení dynamických momentů pro zrychlení

Výpočet požadovaného úhlové zrychlení motoru: [7]

$$\alpha_{am} = \frac{2 * a_a}{d_b} * i \quad (4.109)$$

$$\alpha_{aMot} = \frac{2 * 0,1}{0,046} * 30$$

$$\alpha_{aMot} = 130,44 \text{ rad/s}$$

Výpočet dynamického momentu potřebného k urychlení rotačních setrvačných hmot na straně motor - převodovka:

$$M_{am} = (J_m + J_p) * \alpha_{am} \quad (4.110)$$

$$M_{am} = (0,00125 + 0,0002) * 130,44$$

$$M_{am} = 0,1891 \text{ Nm}$$

Výpočet dynamického momentu potřebného k urychlení setrvačných hmot na straně bubnu - zátěže.

$$M_{2ab} = (J_{mg} + J_b) * \frac{\alpha_{am}}{i} \quad (4.111)$$

$$M_{2ab} = (0,0279 + 2,645 * 10^{-3}) * \frac{130,44}{30}$$

$$M_{2ab} = 0,1328 \text{ Nm}$$

Přepočet dynamického momentu potřebného k urychlení bubnu a zátěže na hřídel motoru:

$$M_{1ab} = M_{2ab} * \frac{1}{i} \quad (4.112)$$

$$M_{1ab} = 0,1328 * \frac{1}{30}$$

$$M_{1ab} = 4,4269 * 10^{-3} \text{ Nm}$$

#### 4.1.3 Určení dynamických momentů pro zpomalení

Výpočet požadovaného úhlové zpomalení motoru: [7]

$$\alpha_{dm} = \frac{2 * a_d}{d_B} * i_p \quad (4.113)$$

$$\alpha_{dm} = \frac{2 * (-0,1)}{0,046} * 30$$

$$\alpha_{dm} = -130,44 \text{ rad/s}$$

Výpočet dynamického momentu potřebného k zpomalení rotačních setrvačných hmot na straně motor - převodovka:

$$M_{dm} = (J_m + J_p) * \alpha_{dm} \quad (4.114)$$

$$M_{dm} = (0,00125 + 0,0002) * (-130,44)$$

$$M_{dm} = -0,1891 \text{ Nm}$$

Výpočet dynamického momentu potřebného k zpomalení setrvačných hmot na straně bubnu a zátěže.

$$M_{2db} = (J_{mg} + J_b) * \frac{\alpha_{dm}}{i} \quad (4.115)$$

$$M_{2db} = (0,0279 + 2,645 * 10^{-3}) * \frac{(-130,44)}{30}$$

$$M_{2db} = -0,1328 \text{ Nm}$$

Přepočet momentu potřebného ke zpomalení bubnu a zátěže na hřídel motoru:

$$M_{1db} = M_{2db} * \frac{1}{i} \quad (4.116)$$

$$M_{1db} = (-0,1328) * \frac{1}{30}$$

$$M_{1db} = -4,4269 * 10^{-3} Nm$$

#### 4.1.4 Určení požadovaného momentu motoru

Rozběh zvedání vozíku na požadovanou rychlost (z 0 m/s na 0,1m/s):

$$M_m = M_{pr} + \Delta M + M_{am} + M_{1ab} \quad (4.117)$$

$$M_m = 0,3968 + 0,5413 + 0,1891 + 4,4269 * 10^{-3}$$

$$M_m = 1,1316 Nm$$

Zvedání vozíku konstantní rychlostí 0,1 m/s:

Aby došlo k momentové rovnováze, musí platit, že moment motoru se musí rovnat součtu přepočítaného momentu pracovního mechanismu na hřídel motoru a ztrátového momentu převodovky.

$$M_m = M_{pr} + \Delta M \quad (4.118)$$

$$M_m = 0,3968 + 0,5413$$

$$M_m = 0,9381 Nm$$

Pracovní bod pohonu se nachází v prvním kvadrantu.

Dojezd při zvedání vozíku na nulovou rychlost (z 0,1 m/s na 0 m/s):

$$M_m = M_{pr} + \Delta M + M_{dm} + M_{1db} \quad (4.119)$$

$$M_m = 0,3968 + 0,5413 - 0,1891 - 4,4269 * 10^{-3}$$

$$M_m = 0,7446 Nm$$

Nulové otáčky:

Při nulových otáčkách dojde k aktivaci brzdy - to znamená, že ztrátový moment motoru, ztrátový moment převodovky a moment pracovního mechanismu přepočítaný na hřídel motoru jsou nulové. Pak moment motoru se rovná nule.

$$M_m = 0 Nm \quad (4.120)$$

Rozběh spouštění vozíku na konstantní rychlost (z 0 m/s na -0,1 m/s):

$$M_m = M_{pr} - \Delta M - M_{am} - M_{1ab} \quad (4.121)$$

$$M_m = 0,3968 - 0,5413 - 0,1891 - 4,4269 * 10^{-3}$$

$$M_m = -0,338 \text{ Nm}$$

Spouštění vozíku konstantní rychlostí 0,1 m/s:

Při změně směru otáčení hřídele, ztrátový moment převodovky změnil své znaménko a u momentu pracovního mechanismu přepočítaného na hřídel motoru zůstává znaménko stejné.

$$M_m = M_{pr} - \Delta M \quad (4.122)$$

$$M_m = 0,3968 - 0,5413$$

$$M_m = -0,1445 \text{ Nm}$$

Při spouštění se musí určit, v jakém pracovním kvadrantu se bude pracovní bod pohonu pohybovat. V tomto případě převládá pasivní složka momentu ( $\Delta M$ ) nad aktivní složkou ( $M_{pr}$ ). To znamená, že výsledný pracovní kvadrant je třetí (silové spouštění).

Dojezd při spouštění vozíku na nulovou rychlost (z -0,1 m/s na 0 m/s):

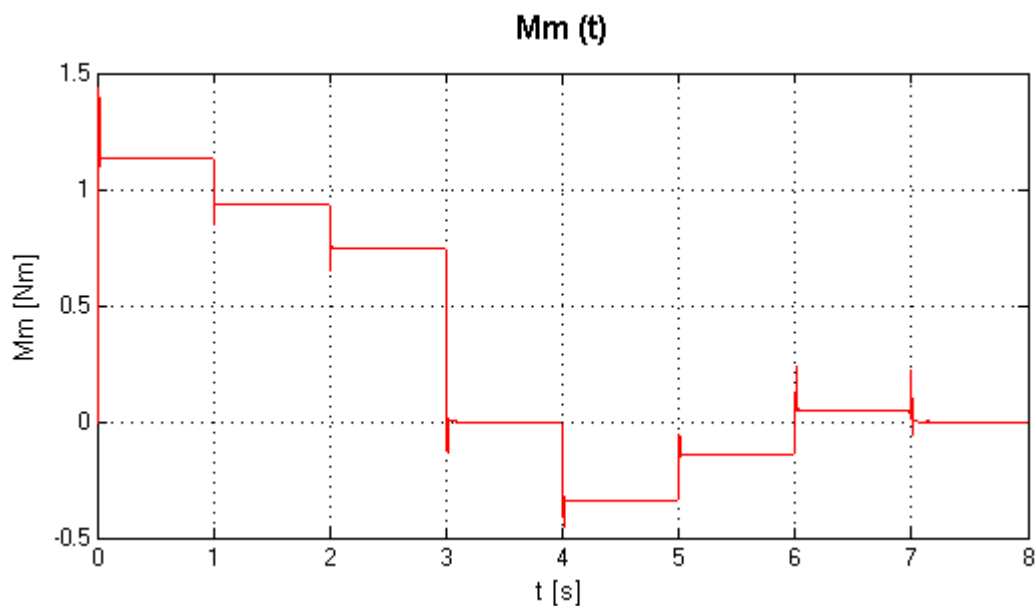
$$M_m = M_{pr} - \Delta M - M_{dm} - M_{1db} \quad (4.123)$$

$$M_m = 0,3968 - 0,5413 - (-0,1891) - 4,4269 * 10^{-3}$$

$$M_m = 0,049 \text{ Nm}$$

#### 4.1.5 Grafické znázornění veličin ze simulačního modelu

Na obr. 46 je průběh momentu motoru. V prvních třech sekundách lze vidět, že motor má při zvedání vozíku kladný moment, pohybuje se v prvním kvadrantu. V průběhu třetí sekundy jsou nulové otáčky a aktivovaná brzda. Ve 4 s – 7 s dochází ke spouštění vozíku. Lze vidět, že motor má záporný moment ve 4 s – 6 s a pracuje tak ve třetím kvadrantu. V šesté sekundě je moment motoru kladný a při záporných otáčkách motor pracuje ve čtvrtém kvadrantu. V tab. 3 je porovnání vypočtených a nasimulovaných hodnot momentu motoru.

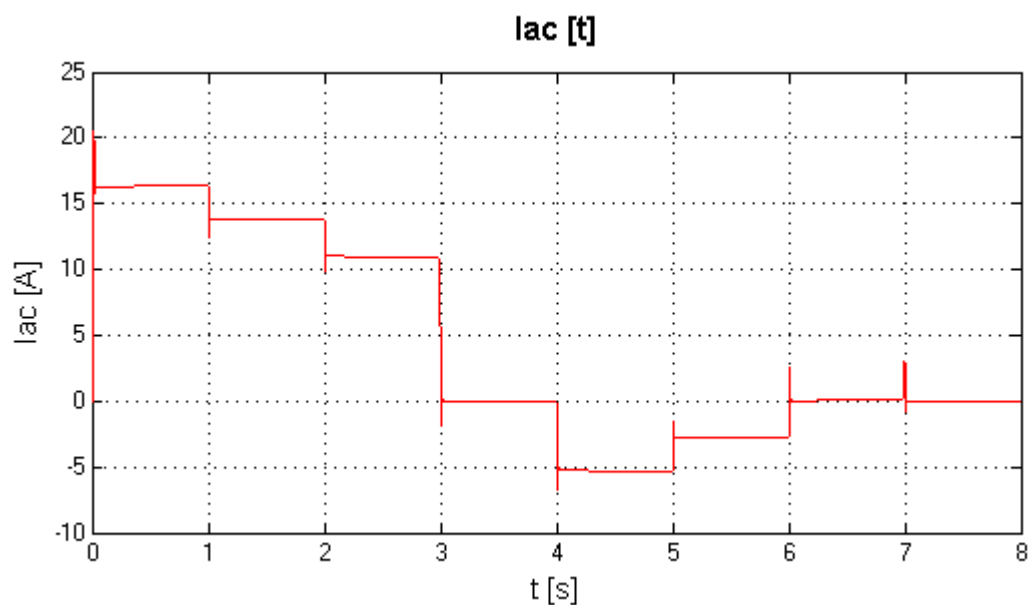


Obr. 46. Průběh momentu motoru.

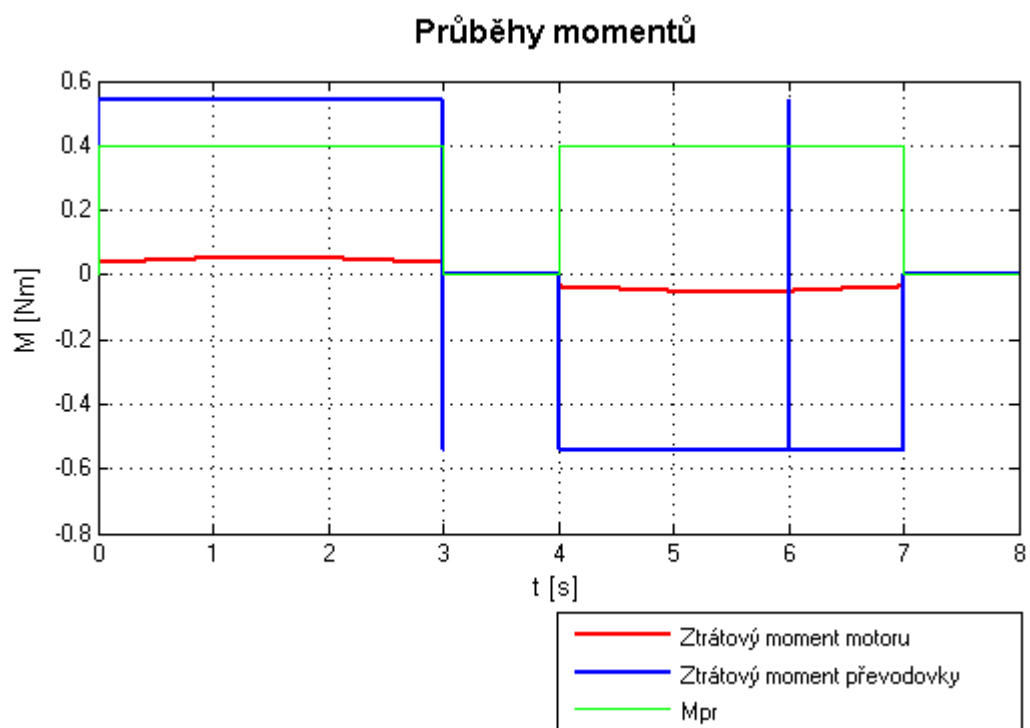
Tab. 3. Srovnání vypočtených a nasimulovaných hodnot momentu motoru.

Čas	Moment motoru [Nm]	
	Vypočtené hodnoty	Nasimulované hodnoty
0 s - 1 s	1,1316	1,1329
1 s - 2 s	0,9381	0,9381
2 s - 3 s	0,7446	0,7433
3 s - 4 s	0	0
4 s - 5 s	-0,338	-0,3393
5 s - 6 s	-0,1445	-0,1445
6 s - 7 s	0,049	0,0503
7 s - 8 s	0	0

Na obr. 47 je znázorněn průběh kotevního, který má stejnou polaritu jako moment motoru. Při aktivované brzdě neteče motorem žádný proud.



Obr. 47. Průběh kotevního motoru.

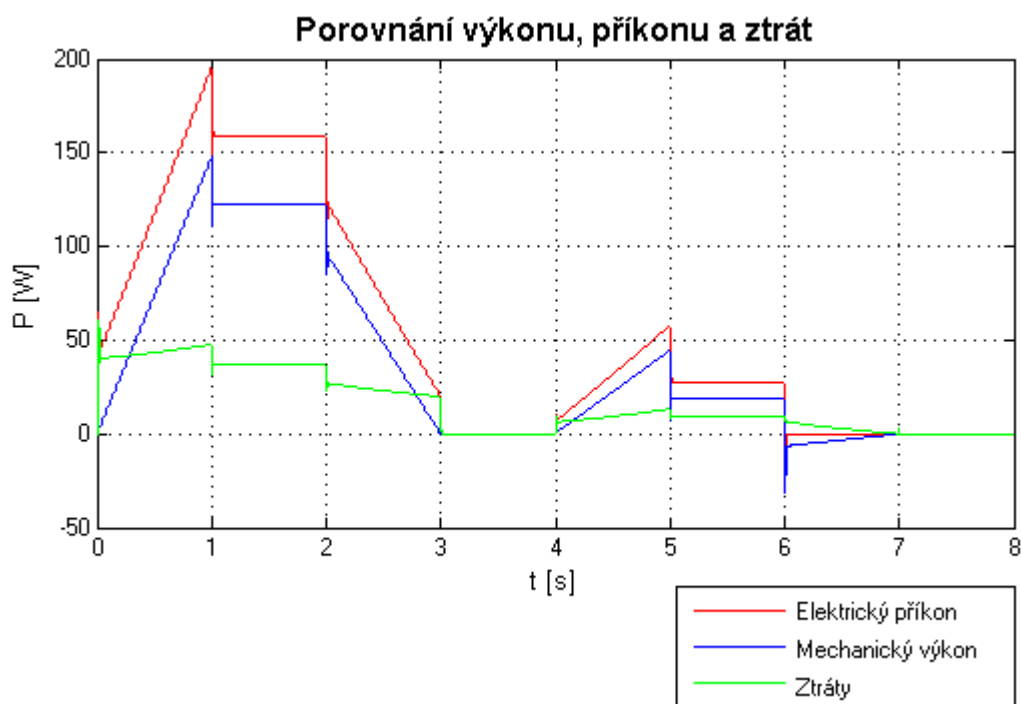


Obr. 48. Porovnání průběhů ztrátového momentu motoru, ztrátového momentu převodovky a momentu pracovního mechanismu přepočítaného na hřídel motoru.



Na obr. 48 jsou porovnávány jednotlivé momenty. Moment pracovního mechanismu přepočítaný na hřídel motoru nemění své znaménko a je v celém průběhu zvedání a spouštění kladný. Ztrátový moment převodovky mění své znaménko podle smyslu rychlosti. V prvním a třetím pracovním kvadrantu působí proti momentu motoru, ale ve čtvrtém pracovním kvadrantu mění moment motoru znaménko (obr. 46.) a tím ztrátový moment převodovky podporuje moment motoru. Ztrátový moment motoru vychází ze stálých ztrát naprázdno, lze vidět, že při vyšších otáčkách tento ztrátový moment motoru roste.

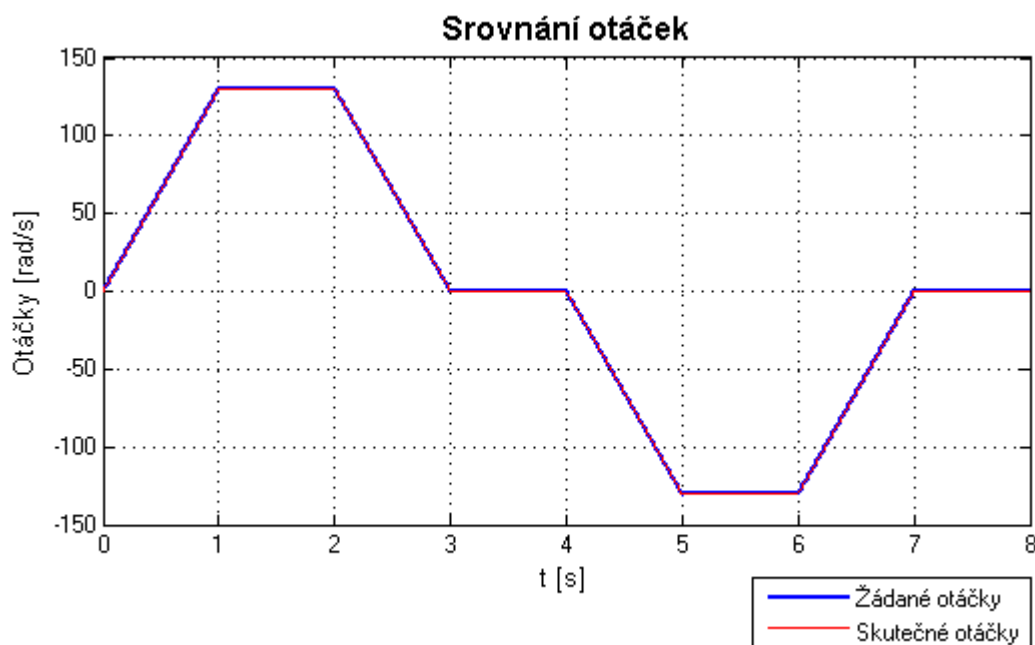
Při porovnání výkonu, příkonu a ztrát na obr. 49 lze vidět oba pracovní režimy motoru. Pro nultou až šestou sekundu platí, že elektrický příkon se rovná součtu mechanickému výkonu a ztrátám v motoru - motor pracuje v motorickém režimu. V 6s – 7s motor pracuje v generátorovém režimu - mechanický výkon (příkon) se rovná součtu ztrát v motoru a elektrického příkonu (výkonu) a energie teče od pracovního mechanismu přes motor do zdroje.



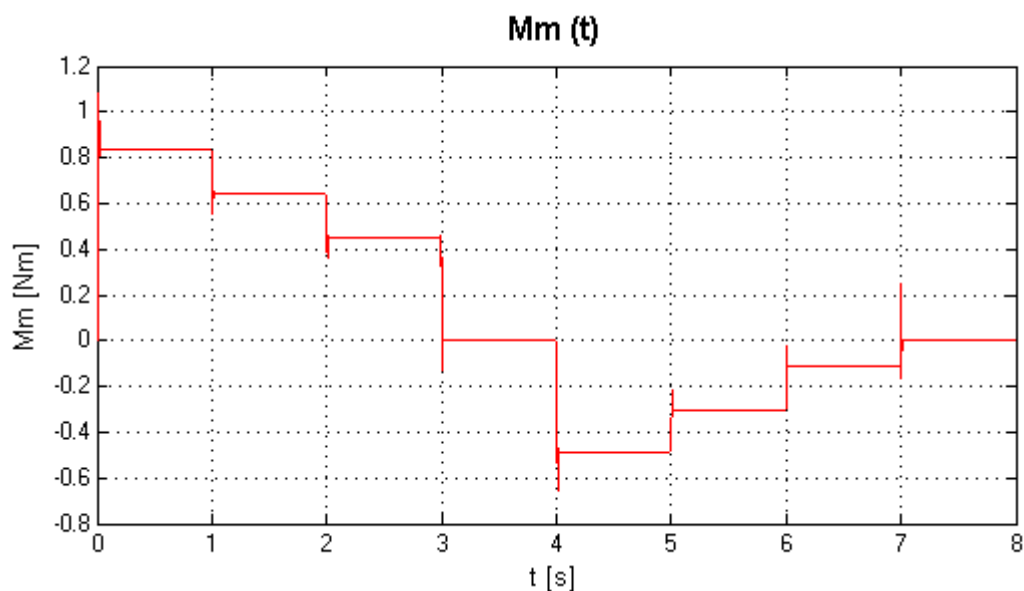
Obr. 49. Porovnání elektrického příkonu, mechanického výkonu a ztrát v motoru.

## 4.2 Zvedání a spouštění prázdného vozíku.

Pro srovnání se druhá simulace provede s prázdným vozíkem. V tab. 1 je srovnání vypočtených hodnot důležitých pro zadání do simulačního modelu. Na obr. 50 je průběh zadanych a skutečných otáček motoru. Průběh otáček je stejný pro plně zatížený vozík i pro prázdný vozík.

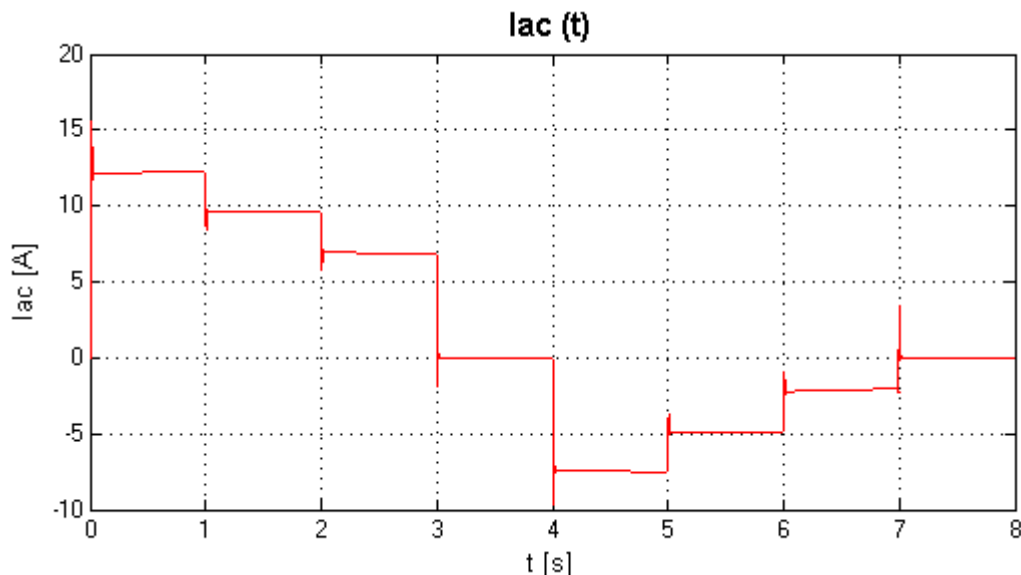


Obr. 50. Zadaný a skutečný průběh rychlosti.



Obr. 51. Průběh momentu motoru.

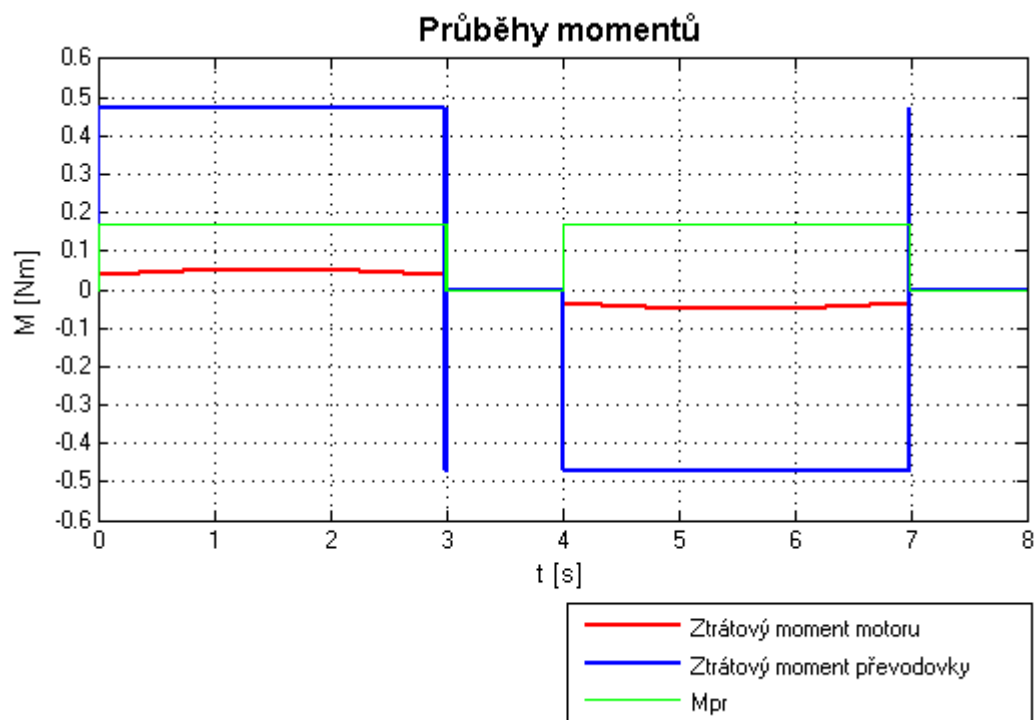
Na obr. 51 je zobrazen průběh momentu motoru. Lze vidět, že motor pracuje jen v motorickém režimu. Při otáčkách větších než nula je moment motoru také větší než nula (první pracovní kvadrant) a při otáčkách menších než nula je moment také menší než nula (třetí pracovní kvadrant).



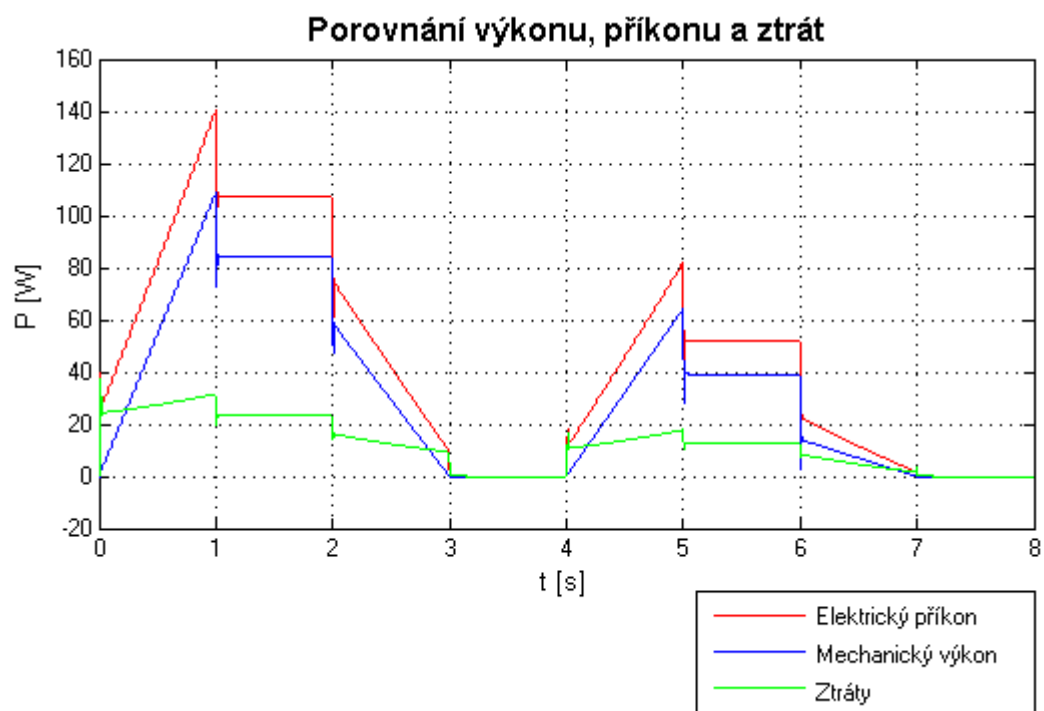
Obr. 52. Průběh kotevního proudu.

Na obr. 52 je znázorněn průběh kotevního proudu. Ať už při simulaci s prázdným vozíkem nebo plně naloženým vozíkem nebyl motor dostatečně zatížen, proto nedošlo k proudovému omezení. Aby šlo vidět toto nastavené proudové omezení, muselo by být do vozíku dáno další závaží.

Průběh ztrátového momentu motoru, ztrátového momentu převodovky a momentu pracovního mechanismu přepočítaného na hřídel motoru je na obr. 53. Proti momentu motoru (obr. 51.), který je v 4s – 7s menší než nula působí ztrátový moment převodovky a moment pracovního mechanismu přepočítaného na hřídel motoru v celém rozsahu otáček menších než nula. Ztrátový moment motoru má stejnou velikost jako u simulace s vozíkem se závažím 30 Kg, to je způsobeno závislostí na průběhu otáček motoru, které jsou pro obě simulace stejné.



Obr. 53. Porovnání průběhů ztrátového momentu motoru, ztrátového momentu převodovky a momentu pracovního mechanismu přepočítaného na hřídel motoru.



Obr. 54. Porovnání elektrického příkonu a mechanického výkonu a ztrát v motoru.

U simulace s prázdným vozíkem jde vidět na obr. 54, že směr toku energie je jen jedním směrem a to od zdroje do motoru a dále do pracovního mechanismu. To dokládají hodnoty elektrického příkonu a mechanického výkonu, které jsou větší než nula v celém rozsahu simulace. Příkon se rovná součtu mechanického výkonu a ztrátám.

### 4.3 Porovnání vykonané práce.

V tab. 4 jsou výsledky porovnání vykonané práce, při zvedání nebo spouštění vozíku.

*Tab. 4. Porovnání práce a celkové účinnosti.*

	Zvedání vozíku		Spouštění vozíku	
	Závaží 0 kg	Závaží 30 kg	Závaží 0 kg	Závaží 30 kg
$W_p$ [ J ]	230,8	347,9	109,4	59,28
$W_v$ [ J ]	167,7	244,6	78,45	37,62
$W_z$ [ J ]	63,08	103,2	30,98	21,67
$\eta_c$ [ % ]	72,68	70,33	71,69	63,47

## Závěr:

Záměrem této diplomové práce bylo sestavit simulační model v Simulinku, který se skládá z regulovaného DC pohonu propojeného s pracovním mechanismem přes převodovku. Tento model na základě štiťkových a vypočtených hodnot motoru a převodovky počítá jednotlivé ztráty. Správné nastavení regulátorů lze vidět na průběhu žádaných a skutečných otáček (obr. 45.), tyto otáčky se shodují.

Největší část jmenovitých ztrát v motoru způsobuje průchod jmenovitého kotevního proudu vinutím kotvy. Jmenovitá účinnost motoru je tak určena hlavně odporem kotvy, pokud by se použil materiál s minimálním odporem, účinnost motoru by výrazně vzrostla. Čím větší je zatížení motoru, tím teče kotevním vinutím větší proud. Aby nedošlo ke zničení motoru, bylo použito proudové omezení na hodnotu 1,5 násobku proud jmenovitého. Motor však nebyl v simulaci dostatečně zatížen, aby proudové omezení bylo vidět v průběhu kotevního proudu (obr. 47.).

Rozdělení stálých ztrát naprázdno není jednoznačně definováno, proto byly zvoleny přibližné poměry těchto ztrát. Tyto ztráty jsou závislé na otáčkách, to lze vidět na obr. 48, kde tyto stále ztráty naprázdno vytvářejí ztrátový moment motoru, tyto ztráty rostou se zvětšující se rychlostí. Ztráty v převodovce jsou uvedeny v tab. 1. Při zatížení jmenovitým momentem převodovky má převodovka největší účinnost. Při snižování momentu, který převodovka předává pracovnímu mechanismu, klesá její účinnost. Pro prázdný vozík vyšla účinnost převodovky 26,61 % a pro vozík se závažím 30 kg je účinnost 42,31%. V tab. 3 jsou nasimulované a vypočtené hodnoty momenty motorů pro spouštění a zvedání vozíku se závažím 30 kg. Tyto hodnoty se téměř rovnají, malé odchylky jsou způsobeny zaokrouhlováním při výpočtech dynamických momentů.

Na obr. 48 lze vidět rozdíl mezi potenciálním a reakčním zatěžovacím momentem. Potenciální moment (obr. 15) reprezentuje přepočítaný moment pracovního mechanismu na hřídel motoru (nemění znaménko při změně smyslu rychlosti) a reakční moment (obr. 15) reprezentuje ztrátový moment převodovky (mění znaménko při změně smyslu rychlosti). Při porovnání výkonu, příkonu a ztrát na obr. 49, lze určit, v jakém režimu motor pracuje, pokud je výkon a příkon větší než nula, jedná se o motorický režim. Při hodnotách menších než nula, motor pracuje v generátorovém režimu. DC motor při zvedání vozíku se závažím 30 kg pracuje v prvním kvadrantu, při spouštění DC motor pracuje ve třetím a čtvrtém kvadrantu. Ve čtvrtém kvadrantu dochází ke změně toku energie. Při simulaci s prázdným vozíkem motor pracuje pouze v motorickém režimu (obr. 54). Při porovnání účinnosti vykonané práce při zvedání prázdného vozíku a se závažím 30 kg se výrazně neliší (tab. 4). Větší rozdíl v účinnosti vykonané práce se vyskytuje u spouštění vozíku. Výsledky simulace odpovídají výpočtům a teoretickým předpokladům.

Hlavním přínosem této práce je zmapování jednotlivých druhů ztrát a díky tomu, se lze zaměřit na ztráty, které snižují nejvíce účinnost a vlivem technologického pokroku tyto ztráty snižovat (např. použití nových materiálů). Výhodou tohoto simulačního modelu je různé použití při malých změnách v modelu, kdy lze například simulovat chování výtahu s protiváhou při různém zatížení kabiny výtahu.

## Použitá literatura:

- [1] NEBORÁK, I.: *Elektrické regulované pohony II pro kombinované a distanční studium*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2014.
- [2] *Elektrické regulované pohony I - Regulace rychlosti* [online]. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky. [cit. 18. 2. 2017]. Poslední úpravy 17. 8. 2011. Dostupné z: [http://homen.vsb.cz/~hav278/Elektricke\\_regulovane\\_pohony\\_I/Studijni\\_opory/Regulace\\_rychlosti.pdf](http://homen.vsb.cz/~hav278/Elektricke_regulovane_pohony_I/Studijni_opory/Regulace_rychlosti.pdf)
- [3] NEBORÁK, I.: *Modelování a simulace elektronických systémů pro kombinované a distanční studium*. Část 2. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2006.
- [4] NEBORÁK, I.: *Mechatronické systémy pro kombinované a distanční studium*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2009.
- [5] ČERNÝ, M.: *Elektrické pohony I*. Vysoké technické učení v Brně. 2. Vydání. 1980. 326 s.
- [6] HRABOVCOVÁ, V. – RAFAJDUS, P. – FRANKO, M. – HUDÁK, P.: *Meranie a modelovanie elektrických strojov*. 2. Vydání. Žilinská Univerzita, 2009. 335s. ISBN 978-80-8070-924-2.
- [7] *Dimenzování pohonů u vybraných pracovních mechanismů – Navrhování elektrických pohonů* [online]. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky. [cit. 25. 3. 2017]. Poslední úpravy 13. 4. 2012. Dostupné z: [http://homen.vsb.cz/~mlc37/TVB\(FEI\)/Prednasky/11navrhvytahu.pdf](http://homen.vsb.cz/~mlc37/TVB(FEI)/Prednasky/11navrhvytahu.pdf)

## **Seznam příloh:**

**Příloha A:** Simulační model regulovaného DC pohonu s uvažováním ztrát v motoru a převodovce

**Příloha B:** Výpis ze souboru m-file pro detekci kladných otáček

**Příloha C:** Výpis ze souboru m-file pro detekci záporných otáček

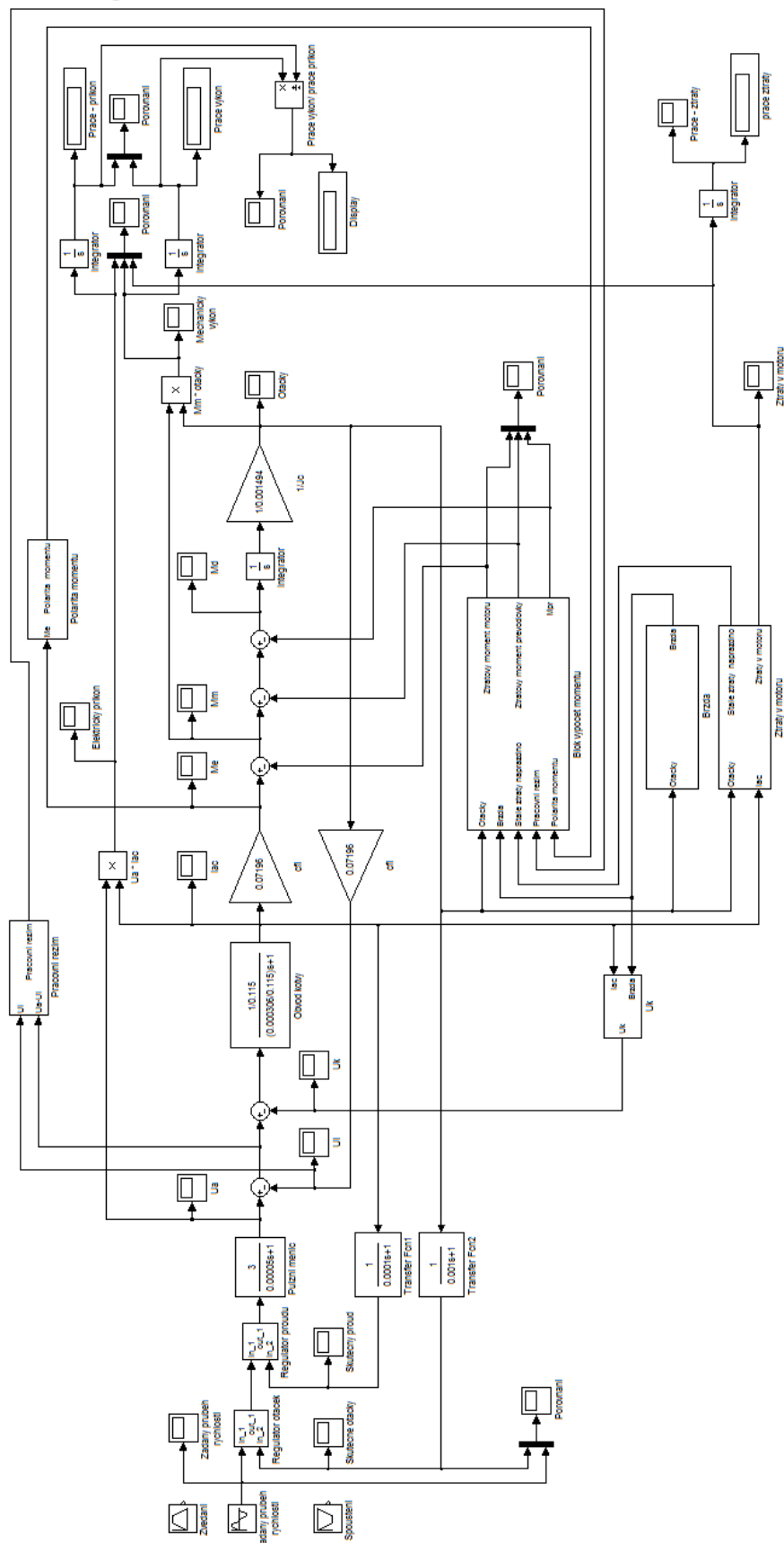
**Příloha D:** Výpis ze souboru m-file pro detekci polarity kotevního proudu

**Příloha E:** Výpis ze souboru m-file pro zjištění pracovního režimu

**Příloha F:** Výpis ze souboru m-file pro zjištění polarity momentu



**Příloha A: Simulační model regulovaného DC pohonu s uvažováním ztrát v motoru a převodovce**



**Příloha B:** Výpis ze souboru m-file pro detekci kladných otáček

```
function[vystup]= KladneOtacky(vstup)

if vstup(1)> 0.5;
vystup(1)= 1 ;
else vystup(1)= 0;
end;
end
```

**Příloha C:** Výpis ze souboru m-file pro detekci záporných otáček

```
function[vystup]= ZaporneOtacky(vstup)

if vstup(1)< -0.5;
vystup(1)= 1 ;
else vystup(1)= 0;
end;
end
```

**Příloha D:** Výpis ze souboru m-file pro detekci polarity kotevního proudu

```
function[vystup]= PolaritaProudu(vstup)

if vstup(1)> 0;
vystup(1)= 1 ;
else vystup(1)= -1;
end;
end
```

**Příloha E:** Výpis ze souboru m-file pro zjištění pracovního režimu

```
function[vystup]= PracovniRezim(vstup)

if vstup(1)> 0;
vystup(1)= 1 ;
else vystup(1)= -1;
end;
end
```

**Příloha F:** Výpis ze souboru m-file pro zjištění polarity momentu

```
function[vystup]= PolaritaMomentu(vstup)

if vstup(1)> 0;
vystup(1)= 1 ;
else vystup(1)= -1;
end;
end
```